

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta strojní**

**Katedra výrobních strojů a konstruování**

**Aplikace technické diagnostiky ve společnosti Honeywell Aerospace  
Olomouc s.r.o.**

**Application of Technical Diagnostics in Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o.**

Student:

**Bc. Petr Adamec**

Vedoucí Diplomové práce:

**Ing. Jan Blata, Ph. D.**

Ostrava 2015

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra výrobních strojů a konstruování

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Petr Adamec**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství  
Specializace: 72 Technická diagnostika, opravy a udržování  
Téma: **Aplikace technické diagnostiky ve společnosti Honeywell Aerospace  
Olomouc**  
**Application of Technical Diagnostics in Honeywell Aerospace Olomouc**

Zásady pro vypracování:

Technická diagnostika obráběcích strojů je vzhledem ke specifickým vlastnostem těchto zařízení velmi problematická a náročná. Mezi tyto specifické odlišnosti lze považovat např. vysoké otáčky, velké nároky na přesnost a nízké vibrace. V rámci této diplomové práce se zabývejte touto problematikou, proberte možnosti a úskalí aplikace diagnostiky na tyto zařízení.

V rámci zadání zpracujte:

1. Rešerši a analýzu dané problematiky.
2. Ideově technický návrh řešení dané problematiky.
3. Zpracujte aplikaci na daný objekt.
4. Proved'te potřebná měření.
5. Proved'te konkrétní provozní vyhodnocení.

Podrobnější specifikaci zadání nebo jeho úpravy provede vedoucí práce nebo firma Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o.

Seznam doporučené odborné literatury:

JENČÍK, J. – VOLF, J. A KOL.: *Technická měření*. ČVUT v Praze 2003, 212 s., ISBN 80-01-02138-6

HELEBRANT, F. – ZIEGLER, J.: *Technická diagnostika a spolehlivost II – Vibrodiagnostika*. VŠB – TU Ostrava, Ostrava 2004, 1. vydání, 178 s., ISBN 80 – 248 – 0650 – 9.

KREIDL, M., ŠMÍD, R. *Technická diagnostika*. BEN – technická literatura, Praha 2006, 1.vydání, 408s. , ISBN 80-7300-157-6

KOPÁČEK, J. *Technická diagnostika hydraulických mechanismů*. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990. 159 s. ISBN 80-03-00308-3.

TŮMA, J.: *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Sdělovací technika Praha 1997, 174 s., ISBN 80-901936-1-7.

Podkladové materiály - ADASH s.r.o., Brüel Kjaer, SKF Ložiska a.s.

ČSN 20 0065 *Metody měření a hodnocení mechanického kmitání-Mezní hodnoty kmitání*. Praha; Český normalizační institut, červen 1992. 16 s.

ČSN 01 6910 *Úprava písemností zpracovaných textovými editory*. Praha: Český normalizační institut, 2007.48 s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Blata, Ph.D.**

Datum zadání: 13.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015



doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář  
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě ..... 19.5. 2015 .....


.....  


podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, же Высoкá школа ба́нская – Техни́кая универзита Острава (да́ле же́н „VŠB-TUO“) ма́ пра́во невьдѣлечнѣ́ к свѣ́ вни́тні́ потре́бѣ дипломо́вую пра́ци у́жит (§ 35 одст. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užití díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užití své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, же оdevздáні́м свѣ́ пра́це souhlasím se zveřejně́ním свѣ́ пра́це podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 19.5. 2015 .....

  
.....  
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Petr Adamec

Adresa trvalého pobytu autora práce: Havanská 2140, 272 01 Kladno

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

ADAMEC, P. *Aplikace technické diagnostiky ve společnosti Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o.: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra výrobních strojů a konstruování, 2015, 86 s. Vedoucí práce: Blata, J.

Diplomová práce řeší praktické využití metod technické diagnostiky, ve výrobním závodě Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. Práce je členěna do dvou hlavních částí. V první je rozebrána teoretická stránka problematiky, od známého názvosloví, vývojová stadia údržby až po aktuální data a metody v oblastech technické diagnostiky. Druhá, praktická část diplomové práce, je zaměřena na samotnou aplikaci technické diagnostiky v Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. Jednotlivé kapitoly praktické části nejprve blíže popisují měřená zařízení, vybrané metody diagnostiky, podmínky měření a v neposlední řadě také data z měření a jejich rozbor. V závěru práce je z vyhodnocených dat učiněn závěr a doporučení pro další provoz měřených zařízení.

## ANNOTATION OF MASTER THESIS

ADAMEC, P. *Application of Technical Diagnostics in Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o.: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Production Machines and Design, 2015, 86 p. Thesis head: Blata, J.

This thesis solves practical use of the technical diagnostics in the Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. Thesis is divided into the two main parts. The first discussed the theoretical aspects of the issue, from a known terminology, developmental stages of maintenance to actual data and methods of the technical diagnostics. The second, practical part of the thesis is focused on application of technical diagnostics in Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. Chapters of the practical part first describes the measurement device, chosen methods of diagnostics, measurement conditions and not least, the data from measurements and their analysis. In the end of the thesis is made the conclusion from the measurement evaluation and recommendations for use of equipment in the future.

# Obsah

Obsah.....	7
Seznam použitého značení .....	9
1 Úvod.....	10
2 Údržba .....	11
2.1 Provozní spolehlivost.....	12
2.2 Vývojové stupně údržby .....	13
3 Technická diagnostika.....	18
3.1 Vibrodiagnostika.....	20
3.2 Tribodiagnostika .....	28
3.2.1 Metody tribodiagnostiky .....	28
4 Vřetena obráběcích strojů .....	30
4.1 Náhon vřeten.....	32
4.2 Vřetenová ložiska .....	33
4.2.1 Valivá ložiska a jejich uspořádání .....	34
4.2.2 Mazání vřetenových ložisek .....	37
5 Aplikace technické diagnostiky v Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. ....	41
5.1 Historie a současnost Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. ....	41
5.2 Údržba v Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. ....	42
5.3 Návrh technické diagnostiky pro vybrané stroje .....	43
5.3.1 Popis a specifikace vybraných strojů .....	43
6 Vibrodiagnostika – podmínky měření, technické údaje.....	47

6.1	Vyhodnocení naměřených dat .....	50
6.1.1	Vyhodnocení měření Mitsui Seiki HS5A č. 5100000406 .....	50
6.1.2	Závěry z vyhodnocení měření Mitsui Seiki HS5A č. 5100000406 .....	61
6.1.3	Vyhodnocení měření Mitsui Seiki HS5A č. 5100000398 .....	61
6.1.4	Závěry z vyhodnocení měření Mitsui Seiki HS5A č. 5100000398 .....	68
7	Tribodiagnostika .....	69
7.1	Obsah vody .....	69
7.2	Stanovení čísla kyselosti .....	71
7.3	RTG spektrometrie .....	72
7.4	Spektrální analýza FT-IR .....	75
8	Závěr .....	78
9	Seznam použité literatury .....	79
10	Seznam obrázků .....	81
11	Seznam tabulek .....	85



## Seznam použitého značení

FFT	<i>Fast Fourier Transformation</i>	Rychlá Fourierova transformace
RMS	<i>Root Mean Square</i>	Efektivní hodnota
ČSN		Česká státní norma
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>	Mezinárodní organizace pro normalizaci
EN		Evropská norma
RAMO		Rychlá analýza motorových olejů
HSC	<i>High Speed Cutting</i>	Vysokorychlostní obrábění
CNC	<i>Computer Numerical Control</i>	Počítačově řízené obrábění
HP	<i>Horse Power</i>	Koňská síla
RPM	<i>Root per Minute</i>	Otáčka za minutu
FT-IR		Infračervená spektrometrie s Fourierovou transformací
FTF		Chybová frekvence poškození klece

<b>Značka</b>	<b>Veličina</b>	<b>Jednotka</b>
$V_e$	Efektivní rychlost vibrací	$\text{mm.s}^{-1}$
$S_e$	Efektivní výchylka vibrací	$\mu\text{m}$
$a_e$	Efektivní zrychlení vibrací	$\text{g}$
ppm	Počet částic na milion (Parts per Million)	10 000 ppm = 1%

# 1 Úvod

Jedním z faktorů ovlivňujícím produktivitu výrobních zařízení, je míra jejich provozní spolehlivosti. Neplánované odstávky, které sebou nesou výpadky produkce, jsou pro každý výrobní podnik nežádoucí. Udržení vysoké míry provozní spolehlivosti, je v dnešní době možné jen s dokonalým systémem údržby. Technická diagnostika, jako nástroj prediktivní údržby požadavky na vysokou provozní spolehlivost maximálně naplňuje. S jejím využitím je možné určit skutečný stav strojních zařízení a predikovat tak dobu do nutné odstávky, popř. zbývající životnost zařízení. Umožňuje tak co nejvyšší využití výrobních kapacit strojů. V době, kdy se s kvalitou a spolehlivostí setkáváme v každodenních souvislostech, si optimální systém údržby bez technické diagnostiky dokážeme jen těžko představit. Sama jako taková, ale k udržení vysoké úrovně systému údržby nestačí. K tomu je nutné, aby každý výrobní podnik přistupoval k údržbě, jako k součásti svého výrobního procesu.

Ve své diplomové práci se zabývám právě technickou diagnostikou. Její aplikaci jsem realizoval ve společnosti, zabývající se výrobou součástí leteckých motorů. V Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. má údržba své pevné místo a jsou na ni kladeny vysoké nároky. Svou kvalitou se řadí mezi vyspělé generace údržby, avšak technická diagnostika si zde teprve hledá své pravé uplatnění. Cílem mé práce je použití metod technické diagnostiky na vybraná obráběcí centra, se zaměřením na jeden z nejdůležitějších celků, jímž je vřeteno. Účelem je zjištění stavu ložisek ve vřetenu, popř. doporučení servisních kroků, v případě nevyhovujícího stavu. Druhým a neméně důležitým cílem, je zhodnocení přínosů implementace technické diagnostiky, do systému údržby v Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o.

## 2 Údržba

Pro tvorbu této kapitoly byla využita literatura [1], [8].

V odborné literatuře můžeme nalézt mnoho výkladů pro údržbu. Já si její definici dovoluji citovat dle normy ČSN EN 13306:2002. „Údržba je kombinace všech technických, administrativních a manažerských činností, během životního cyklu objektu, zaměřených na jeho udržení ve stavu nebo jeho navrácení do stavu, v němž může vykonávat požadovanou funkci.“

Z výše uvedené definice vyplývá, že cílem údržby není nic jiného, než udržování výrobních zařízení v dobrém a provozuschopném stavu, za podmínky vynakládání optimálních nákladů. Při hodnocení výrobního zařízení z hlediska jakosti nás bude zajímat zejména jeho spolehlivost. Tento znak si můžeme vyložit, jako stálost užitných vlastností, v průběhu provozního života. V konečném důsledku to tedy znamená, že jediným nástrojem zajištění provozní spolehlivosti se stává údržba. Každý výrobní podnik ji tedy musí chápat, jako součást svého procesu.

Údržba má některé základní vlastnosti a znaky. Patří mezi ně zejména:

### **Plánování (plán údržby)**

Do plánování zahrnujeme činnosti, postupy, zdroje, ale také časové plánování, jinak řečeno veškeré kroky, které jsou nezbytné k provádění údržby.

### **Zajištěnost údržby**

Schopnost organizace, provést v daném okamžiku nebo intervalu údržbářský zásah.

### **Objekt a výměnný objekt**

Pod tímto pojmem je třeba představit si jakoukoliv část, součást, zařízení, přístroj, systém, popř. subsystém, kterým je nutné se v údržbě individuálně zabývat. Výměnný objekt, jinak také náhradní díl pak slouží za účelem náhrady odpovídajícího objektu a k obnovení požadované funkce celé jednotky. Objekt jako takový charakterizují tyto vlastnosti:

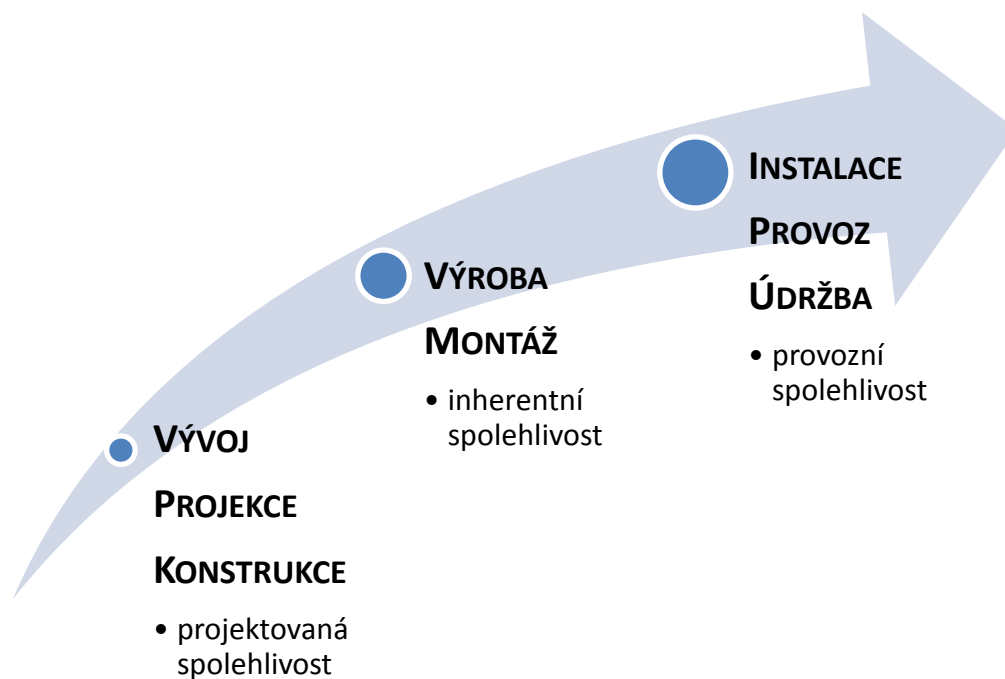
- Pohotovost – schopnost objektu vykonávat požadovanou funkci v daném časovém intervalu za předpokladu splnění daných podmínek a

zajištění vnějších zdrojů (bezporuchovost, zajištěnost údržby, udržitelnost).

- Bezporuchovost – schopnost objektu vykonávat požadovanou funkci v daných podmínkách a časovém intervalu.
- Udržitelnost – vlastnost objektu setrvat v daných podmínkách nebo být navrácen do stavu, ve kterém může plnit požadovanou funkci.
- Životnost – schopnost objektu vykonávat v daných podmínkách svou činnost, za podmínky použití údržby, až do dosažení svého mezního stavu.
- Užitečný život – interval, počínající daným časovým okamžikem a končící ve chvíli, kdy se intenzita poruch stane nepřijatelnou nebo kdy je objekt z důvodu poruchového stavu, popř. jiných důsledků považován za neopravitelný.

## **2.1 Provozní spolehlivost**

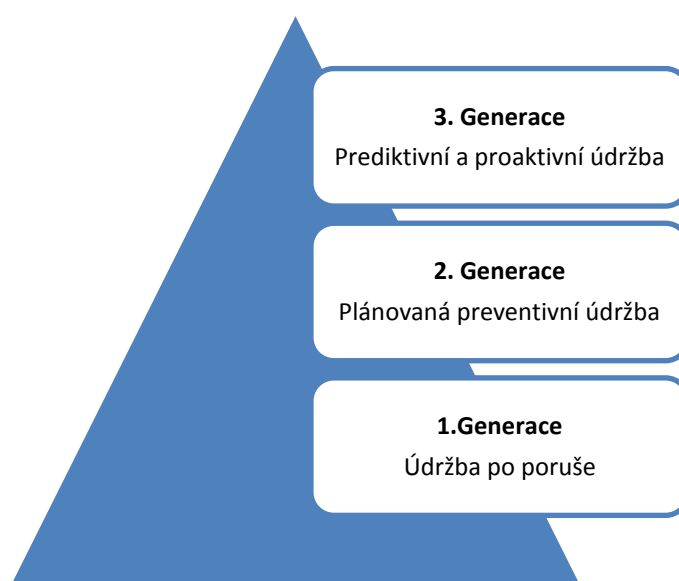
V případě provozní spolehlivosti mluvíme o vlastnosti objektu, plnit určité funkce v mezích přípustné tolerance, při daných provozních podmínkách a požadované době provozu. Je důležité mít na paměti, že provozní spolehlivost zasahuje do celého technického života objektu. Jak je patrné z obr. 2-1, provozní spolehlivost se objevuje již při vývoji konstrukce. V tomto případě mluvíme o projektované spolehlivosti. Další etapou je inherentní spolehlivost, která odpovídá fázi výroby a montáže. Poslední, pro technický život nejdůležitější etapou je potom již zmíněná provozní spolehlivost. Do té se zahrnuje instalace technického objektu, jeho provoz a údržba. Z výše zmíněného je zřejmé, že provozní spolehlivost může být negativně ovlivněna již v době projektování technického objektu. Z tohoto důvodu je velmi důležitá zpětná vazba ze sledování provozní spolehlivosti. Ta by poté měla vést k nové projekci nespolehlivého konstrukčního uzlu nebo části technického objektu.



Obr. 2-1 Provozní spolehlivost v průběhu života zařízení [1]

## 2.2 Vývojové stupně údržby

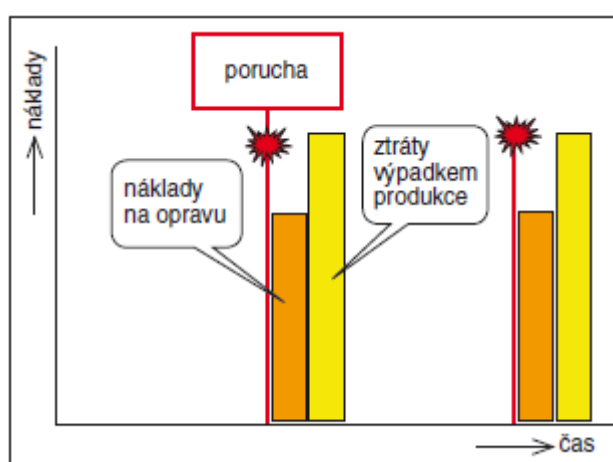
Z historického vývoje je možné definovat mnoho znaků, podle nichž je možné údržbu členit. Všeobecně je ale zvykem třídění údržby do třech vývojových stupňů, resp. generací údržby.



Obr. 2-2 Generační vývoj systémů údržby [1]

## Údržba po poruše

V průběhu provozu zařízení vyžaduje velmi nízké náklady. Je to důsledkem skutečnosti, že k poruchám při takovém provozu zákonitě dochází a údržba poté řeší následky. Nemluvíme však pouze o bezprostředních následcích, kterými je např. výměna nefunkčních, popř. poruchou zničených částí, ale také následky vyplývající z poruchy, jako jsou dlouhodobé odstávky, výrobní prostoje, apod. Není náhodou, že ztráty vyvstávající z odstávky stroje, jsou nezřídka vyšší, než samotné náklady na obnovení provozuschopného stavu zařízení. I když je zřejmé, že tento model údržby je naprosto neefektivní, stále můžeme v dnešní době najít výrobní podniky, které tento systém užívají.

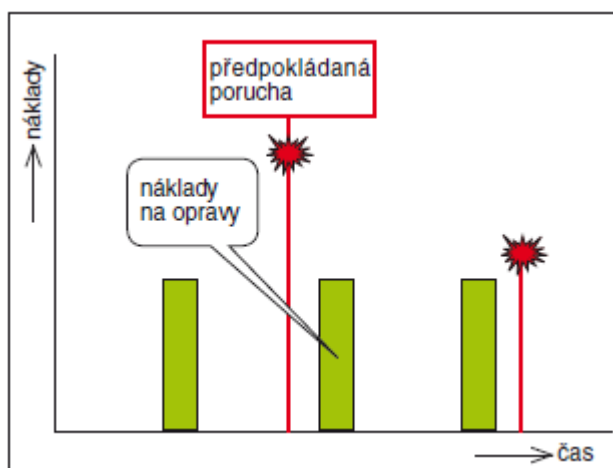


Obr. 2-3 Schéma modelu údržby po poruše [8]

## Údržba preventivní

Jedná se o generaci údržby, která ve své podstatě vychází z definice spolehlivosti. Preventivní údržba je založena na tom, že každý konstrukční celek nebo součást má svou teoretickou spolehlivost. Dle této teoretické spolehlivosti je poté možné určit intervaly oprav nebo výměny některých součástí, popř. konstrukčních celků. Jinými slovy mluvíme o údržbě dle časového plánu.

Podstatnou výhodou proti první generaci údržby, je možnost ve velké většině případů předcházet poruchám. V případě výskytu poruchy nejsou náklady na uvedení do provozuschopného stavu tak vysoké, jako tomu je u modelu údržby po poruše. Na druhou stranu, je třeba počítat s ne zrovna zanedbatelnými náklady na plánované preventivní výměny dílů, dle předem stanoveného časového plánu. Celky, které jsou vyměňovány v pravidelných intervalech, totiž ne vždy dosahují svých limitních hodnot a tím pádem jejich výměna představuje zbytečné náklady.

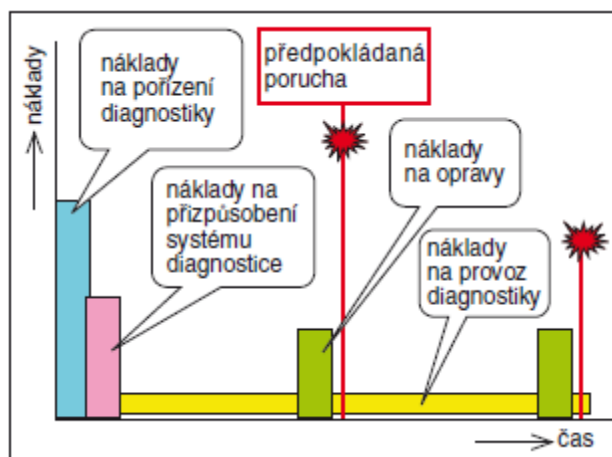


*Obr. 2-4 Schéma modelu preventivní údržby [8]*

### **Údržba prediktivní**

Generaci této údržby dostal do popředí právě rozvoj technické diagnostiky. Jinými slovy je možné tuto údržbu nazvat jako údržbu dle skutečného stavu. Predikce neboli předpověď, či prognóza, znamená, co se stane nebo nestane v budoucnosti. Samozřejmě ale mluvíme o odhadu, který se opírá o vědeckou hypotézu nebo teorii. V tomto systému je předpokladem spojení všech dosažitelných výhod údržby.

Hlavním přínosem této generace, je důsledné odstranění, resp. předcházení poruch. Jednotlivé prvky jsou opraveny, či měněny v optimálním časovém intervalu. Prvky, které ve skutečnosti nedosahují svých limitních hodnot, tedy nejsou zbytečně demontovány a nahrazovány novými, jako tomu je v případě údržby preventivní. Logickým důsledkem je tedy snížení nákladů údržby na minimum. Tím, že předcházíme poruše, snižujeme zároveň i druhotné náklady způsobené poruchou, tedy ztráty vlivem výpadku produkce. Přes zřejmé výhody tohoto modelu údržby je třeba zmínit i jedno negativum a tím je zejména vysoká pořizovací cena systémů pro technickou diagnostiku. Je však třeba podotknout, že další průběžné náklady jsou už jen zanedbatelné, v porovnání s těmi pořizovacími. Abychom byli schopni stanovit správný interval pro údržbu, je nutné zařízení buď trvale sledovat metodou online diagnostiky, popř. alespoň periodicky v pravidelných intervalech. Ze sledovaných provozních parametrů je poté možné určit skutečný stav strojních zařízení a v případě nepřípustných hodnot provést zásah údržby.



Obr. 2-5 Schéma systému prediktivní údržby [8]

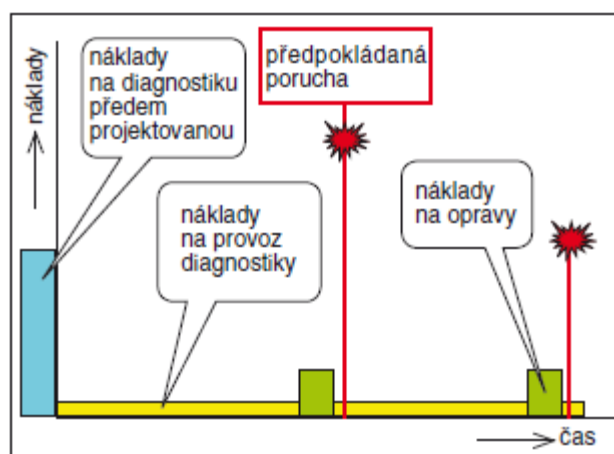
### Údržba proaktivní

Proaktivní údržbu by bylo možné v generačním vývoji systémů údržby vyložit jako samostatnou. Je však otázkou, jestli by bylo toto vyšší postavení opodstatněné. Proaktivní údržbu lze hodnotit spíše jako vylepšení třetí generace, tedy údržby prediktivní. V případě proaktivní údržby, rovněž vycházíme ze skutečného stavu provozovaného objektu. Její podstatou je využití technické diagnostiky, avšak v tomto případě poněkud komplexněji. Komplexním pojetím je myšleno spojení různých metod technické diagnostiky, pro co největší pokrytí sledovaného zařízení.

Proaktivní přístup mnohdy začíná už v prvním stadiu životního cyklu objektu, jímž je konstrukce. Části a celky, které jsou pro provoz stroje důležité, se konstruují právě s ohledem na možnost použití metod technické diagnostiky.

Na obr. 2-6 je vidět efektivita systému proaktivní údržby. Při porovnání s modelem údržby prediktivní, je možné vidět nižší náklady na zavedení diagnostických systémů. Dodatečné zavedení diagnostiky není ve všech případech jednoduchou záležitostí a nezřídka jsou nutné některé úpravy, které znamenají další náklady. Proaktivní přístup, již konstrukci umožňuje volbu optimálních metod technické diagnostiky předem a předchází tak dalším investicím.





Obr. 2-6 Schéma systému proaktivní údržby [8]

V prediktivní a proaktivní údržbě vycházíme z aktuálního stavu stroje. Jednotlivé části procesu je možné rozdělit do pěti stádií:

- a.) **Zjištění počátečního stavu** – pro splnění je nutné provést důkladné měření zařízení a stanovení základních, referenčních hodnot pro následující porovnání.
- b.) **Monitorování** – na zařízení jsou dle zvolené metody diagnostiky definovány měřící body, ve kterých v pravidelných intervalech provádíme měření.
- c.) **Detekce** – data, získaná pravidelným měřením jsou vyhodnocována. Pro každou měřenou veličinu stanovíme limitní hodnoty. Pokud zařízení dosáhne těchto limitních hodnot, znamená to signalizaci problému.
- d.) **Analýza neboli vlastní diagnostika** – analýza slouží pro detekci a rozpoznání příčiny problému zařízení. Pro tento účel je použito nejrůznějších způsobů, dle metod použité diagnostiky – např. FFT analýza při zkoumání vibračního signálu apod. Tato fáze je velice důležitá pro další provoz zařízení. Pokud je analýza špatně provedena, nepodaří se odhalit pravou příčinu problému, ten se poté může opakovat a údržba tak není efektivní.
- e.) **Doporučení** – po správné lokalizaci a určení povahy problému – zjištění příčiny, je možné provést doporučení pro jeho odstranění a vytvoření nápravných akcí k jeho předcházení.

### 3 Technická diagnostika

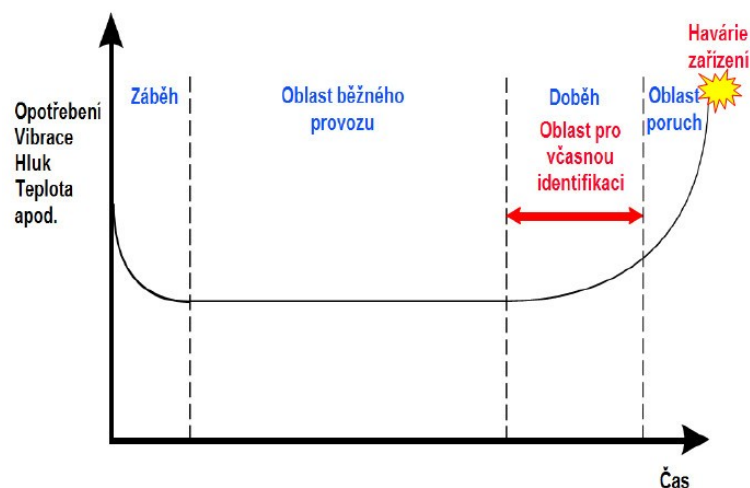
V této kapitole bylo čerpáno z literatury [1], [8].

Původ slova diagnostika nalezneme v řečtině – diagnosis. Jeho význam je možné vyložit, jako určení skrze poznání. S tímto slovem se můžeme celkem běžně setkat v lékařství. S nástupem moderních generací údržby, ale také rozvojem elektrotechniky a automatizace, můžeme tento pojem zaslechnout i ve spojení s technickými obory.

Úlohou technické diagnostiky, je objektivizace technického stavu zařízení a zajištění jeho provozuschopného stavu v současnosti, ale i v budoucím čase. Další a neméně důležitou vlastností je, že technická diagnostika zásadně ovlivňuje bezpečnost provozu a slouží jako prostředek ke snižování bezpečnostních rizik provozu.

U zařízení, na které je aplikována některá z metod technické diagnostiky, popř. kombinace těchto metod, je možné sledovat trend průběhu opotřebení. K sledování tohoto trendu nám slouží tzv. Vanova křivka, viz obr. 3-1. Je rozdělena dle průběhu opotřebení v závislosti na čase do těchto oblastí:

- **oblast záběhu** – na začátku provozu je viditelné opotřebení, které je způsobeno vzájemným záběhem a slícováním součástí
- **oblast běžného provozu** – opotřebení se snižuje, je na úrovni běžného provozního opotřebení
- **oblast doběhu** – stejně, jako u první oblasti je viditelné zvýšené opotřebení, ovšem v tomto případě je způsobeno procesem stárnutí a degradací materiálů součástí
- **oblast poruch** – pokud nedojde v předchozí fázi k patřičné reakci, stav zařízení se neustále zhoršuje a porucha je prakticky nevyhnutelná



Obr. 3-1 Vanova křivka [4]

Technickou diagnostiku můžeme dělit dle různých faktorů. Obecně užíváme dělení dle nasazení, z hlediska řešeného úkolu nebo dle snímané fyzikální veličiny. Základní rozdělení je:

- Technická bezdemontážní diagnostika – zahrnuje testování vybraných technických parametrů, neboli testovou diagnostiku a provozní technickou diagnostiku, zaměřující se na zkoumané diagnostické parametry, jako je vibrodiagnostika, termodiagnostika, tribodiagnostika, apod.
- Technická nedestruktivní diagnostika – jinak nazývaná jako defektoskopie, pomocí které zjišťujeme povrchové nebo vnitřní vady materiálu.

Rozdělení dle snímané fyzikální veličiny:

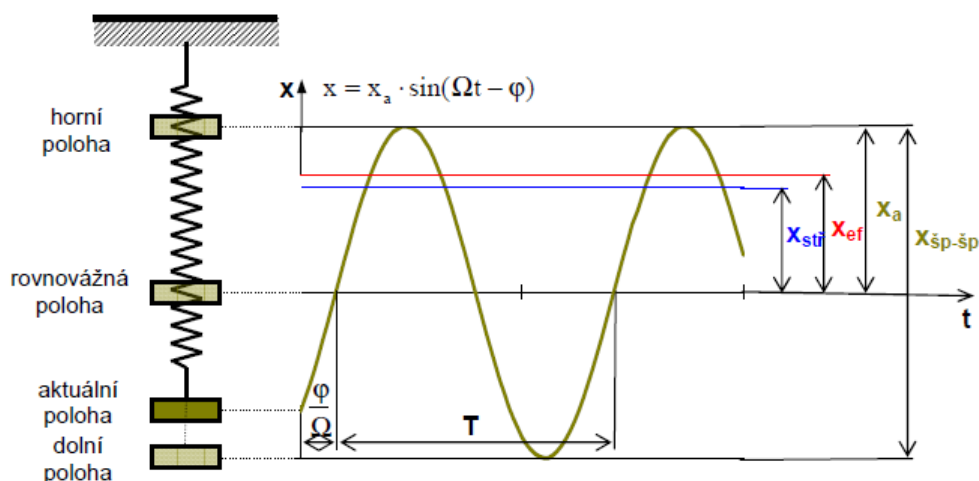
- Vibrodiagnostika
- Tribodiagnostika
- Termodiagnostika
- Akustická diagnostika
- Elektrodiagnostika

### 3.1 Vibrodiagnostika

V této podkapitole bylo využito literatury [2], [4], [5], [6], [9].

Každé zařízení, jehož činnost je založena na principu rotačního pohybu, generuje při svém chodu vibrace. Tyto vibrace jsou přímým důsledkem dynamického namáhání stroje a k jejich úrovni přispívá stav ložisek, převodovek, mazání, výskyt nevývahy, nesouososti, popř. mechanické poškození, jako jsou trhliny apod. Úlohou vibrodiagnostiky je včasné odhalení těchto negativních jevů a naplánování servisních kroků pro jejich odstranění. Nadměrné hodnoty vibrací mohou strojní zařízení vážně poškodit, a proto patří jejich monitorování ke stěžejním metodám technické diagnostiky.

#### Základní pojmy a vztahy pro kmitavý pohyb



Obr. 3-2 Veličiny popisující harmonický pohyb [5]

Vztah pro harmonický kmitavý pohyb:

$$x(t) = x_a \cdot \sin(\omega t - \varphi)$$

kde  $x_a$ ... amplituda harmonického kmitání (mm)

$\omega$ ... vlastní kruhová frekvence (rad/s)

$\varphi$ ... počáteční fázový úhel

$x_{ef} = 0,707 \cdot x_a$  (efektivní hodnota – RMS = 0,707 x amplituda)

$x_{stř} = 0,637 \cdot x_a$  (střední hodnota = 0,637 x amplituda)

$x_{šp-šp} = 2 \cdot x_a$  (rozkmit – velikost špička / špička = 2 x amplituda)

Okamžitá výchylka:

$$x = x_{max} \cdot \sin(\omega \cdot t) \text{ [mm]}$$

Rychlost:

$$v = \frac{d_x}{d_t} = V_{max} \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2}\right) \text{ [mm} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

Zrychlení

$$a = \frac{d_v}{d_t} = \frac{d_x^2}{dt^2} = A_{max} \cdot \sin(\omega \cdot t + \pi) \text{ [mm} \cdot \text{s}^{-2}\text{]}$$

Ve většině případů nemá kmitání čistě harmonický průběh. U těchto signálů vycházíme z matematických vztahů pro efektivní a střední hodnotu, ale amplituda signálu již nemá takový význam. Pro popis vibračního signálu, který nemá harmonický charakter je daleko vhodnější použití efektivní hodnoty, jež nám poskytuje průměrný výkon měřené veličiny.

Efektivní hodnotu neboli RMS (Root Mean Square) vyjadřujeme vztahem:

$$x_{ef} = x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T x^2 dt}$$

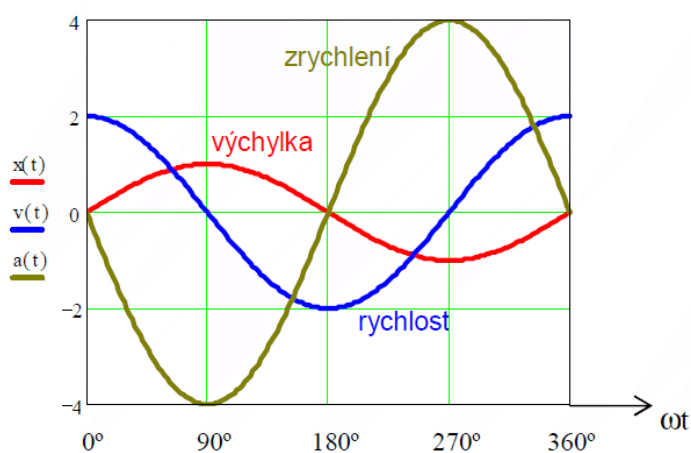
V praktickém využití efektivní hodnoty, je důležité mít na paměti, že při opakování měření nebude mít vždy identickou hodnotu. Důvodem je doba měření a amplituda. Tyto veličiny, se v praktickém využití při měření vibrací ve většině případů neshodují. Efektivní hodnota je poté vždy vypočítána náhodně, z vybrané časové vlny.

## Měřené veličiny

Při měření vibrací získáváme a vyhodnocujeme tři základní veličiny. Patří mezi ně:

- Výchylka vibrací ( $\mu\text{m}$ ) – obvykle využívaná pro sledování technického stavu turbín, popř. u strojů, jejichž nosná konstrukce je mnohem větší, než rotorová část.
- Rychlost vibrací ( $\text{mm.s}^{-1}$ ) – nachází uplatnění zejména při diagnostice poruch, které mají charakter nízkých nebo středních frekvencí. Mezi ně patří nevývaha, nesouosost, uvolnění apod.
- Zrychlení vibrací ( $\text{mm.s}^{-2}$ , g) – měřením této mechanické veličiny je možné rozpoznat závady projevující se ve vysokých frekvencích, řádově kolem desítek kHz. V těchto frekvencích je možné diagnostikovat především závady ložisek, převodů apod.

Každá ze zmíněných veličin má svůj matematický popis. Máme-li tedy hodnotu jedné z těchto veličin, zbývající je poté možné dopočítat. Mezi těmito veličinami je zároveň fázový posun, jak je vidět na obr. 3-3. Z obrázku je patrné, že výchylka a zrychlení jsou vůči sobě v protifázi. Rychlost je pak k oběma veličinám posunuta o  $90^\circ$ .



Obr. 3-3 Fázový posun výchylky, rychlosti a zrychlení vibrací [5]

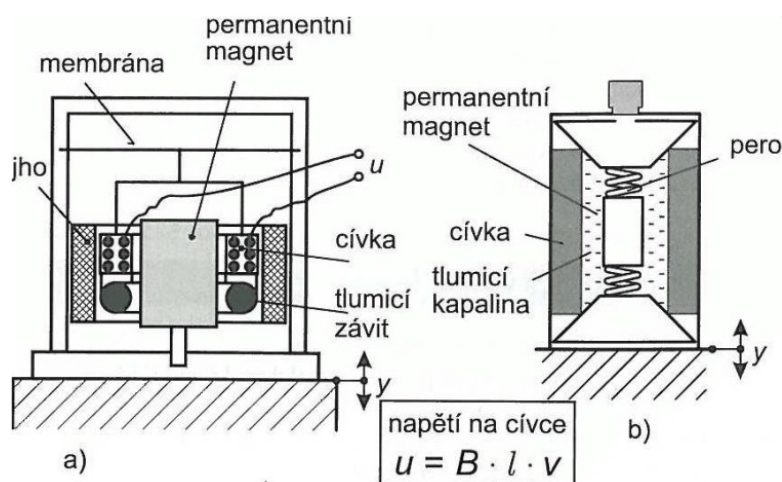
## Snímače vibrací

Při měření vibrací je nejdůležitější kvalita výstupního signálu, který by měl co nejvěrněji odpovídat průběhu mechanického kmitání. Kmitání se vyznačuje vratným pohybem hmotného bodu, kolem své klidové polohy. Snímače vibrací tento pohyb měří a převádí na elektrickou veličinu. Každá z aplikací vyžaduje použití jiného druhu snímače. Obecně snímače vibrací dělíme na dvě základní kategorie:

- Seismická zařízení
- Snímače relativní výchylky

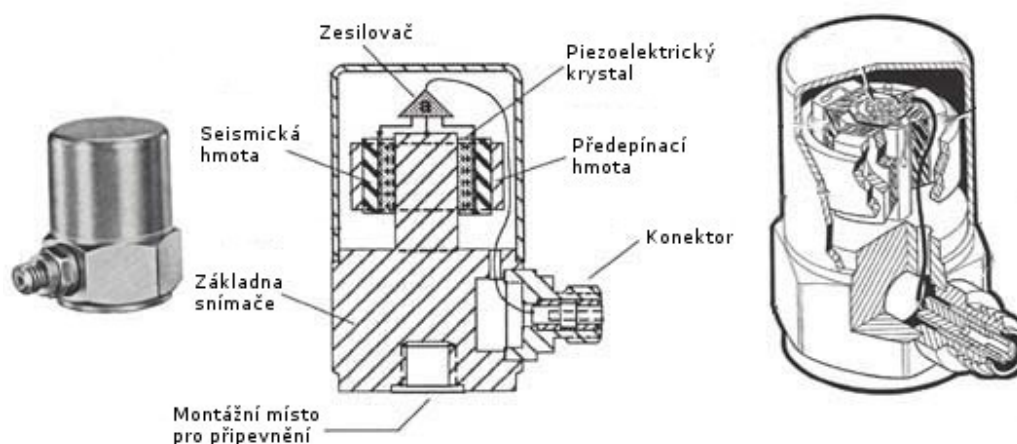
Dále rozdělujeme snímače dle měřené veličiny:

- Snímače výchylky vibrací - vyhodnocují výchylku, vzdálenost nebo polohu od referenční polohy. První druhy byly založeny na kontaktním pákovém mechanismu. V současné době je používán snímač na bázi vířivých proudů, jehož funkce je založena na změně odporu prostředí, při změně vzdálenosti.
- Snímače rychlosti vibrací – jejich funkce je založena na principu elektromagnetické indukce. Elektrické napětí, které se indukuje v cívkě, je přímo úměrné rychlosti změny magnetického pole. Snímač je složen ze dvou hlavních částí, kterými jsou permanentní magnet a cívka



Obr. 3-4 Řez snímačem rychlosti vibrací [14]

- Snímače zrychlení (akcelerometry) – jedná se o nejrozšířenější typ snímače a to zejména pro svou vlastnost, spočívající ve zpracování výstupního signálu na libovolnou veličinu (zrychlení, rychlost, výchylka vibrací). Akcelerometry pracují jako seismická zařízení. Signál na výstupu snímače je proporcionální, vzhledem k mechanickému vibračnímu zrychlení měřeného stroje. Charakteristickou vlastností akcelerometrů je poměrně velký dynamický rozsah. Hlavní konstrukční prvek akcelerometru tvoří piezoelektrický krystal. Na stěnách tohoto krystalu se při působení síly vytváří elektrický náboj, který je přímo úměrný působící síle měřeného zařízení. Akcelerometr tedy vyhodnocuje absolutní míru vibrací, na rozdíl od snímačů výchylky, které měří pouze relativní vibrace – vibrace rotoru vzhledem ke statorové části, která však může sama o sobě kmitat.



Obr. 3-5 Řez akcelerometrem s vyobrazením jednotlivých částí [15]



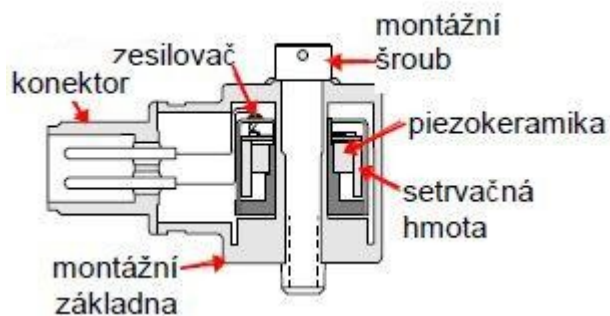
Podle umístění piezoelektrického krystalu a působení síly rozlišujeme tři druhy akcelerometrů:

a) tlakový



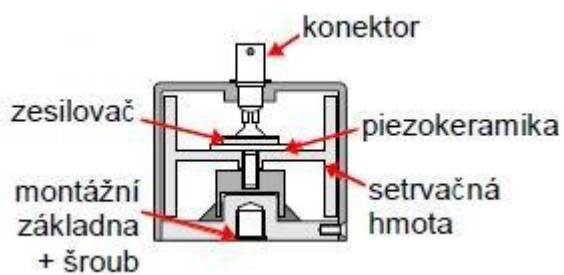
Obr. 3-6 Tlakový akcelerometr [5]

b) smykový



Obr. 3-7 Smykový akcelerometr [5]

c) ohybový



Obr. 3-8 Ohybový akcelerometr [5]

### **Kriteria hodnocení vibrací dle normy ČSN ISO 20 0065**

Norma stanovuje povolené mezní hodnoty mechanického kmitání, pro obráběcí stroje na kovy. Jednotlivé kapitoly normy jsou označeny římskými číslicemi I. - IV. V nich jsou popsány podmínky, způsoby měření a vyhodnocení průměrné hodnoty rychlosti a výchylky mechanického kmitání, pro určené směry a místa na obráběcích strojích.

Dle normy jsou měřeny tyto veličiny:

$V_e$  - efektivní hodnota rychlosti kmitání

$S_e$  - efektivní hodnota výchylky kmitání

Při hodnocení jsou stěžejní hodnoty  $V_e$ . Efektivní hodnota výchylky kmitání je pouze informativní.

Kapitola IV. udává povolené mezní hodnoty mechanického kmitání, dle druhu obráběcího stroje. Z důvodu rozsahu normy a tématu práce uvádím pouze hodnoty týkající se obráběcích center a bezobslužných obráběcích strojů pro nerotační součásti.

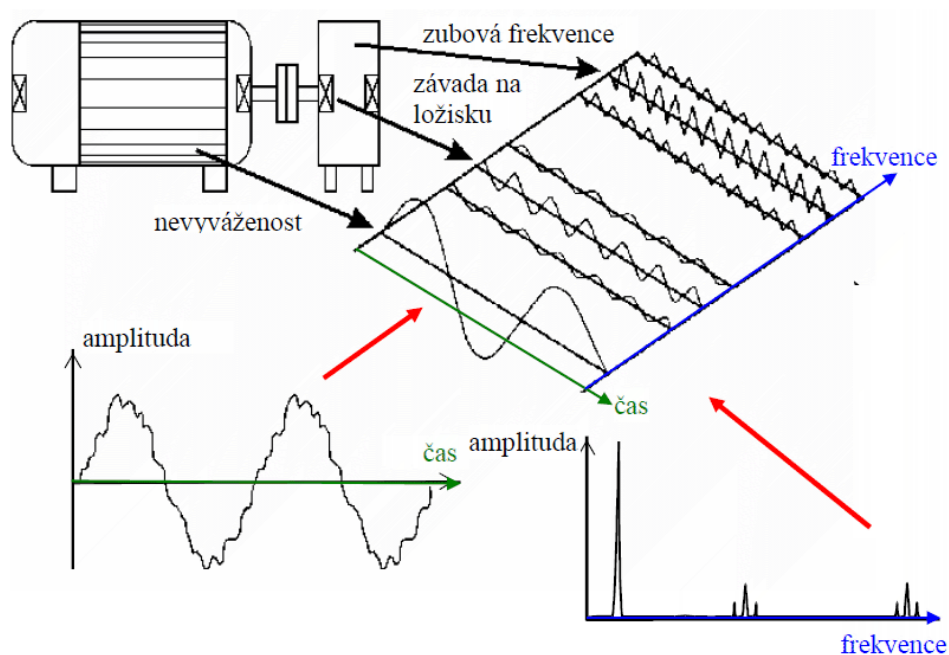
<b>Obráběcí centra a bezobslužné obráběcí stroje pro nerotační součásti</b>	
Maximální průměr dutiny	Mezní hodnoty rychlosti vibrací RMS
< 50 mm	do 1,2 mm/s
> 50 mm	do 1,8 mm/s

*Tab. 3-1 Hodnocení mechanického kmitání obráběcích strojů dle normy ČSN 20 0065 [9]*

## Analýza a vyhodnocení spekter signálu - FFT

Průběh vibračního signálu obvykle znázorňujeme v časové oblasti. Signál je však složený z celé řady vibračních dějů a je tak velmi těžké, vyčíst z něj informace o stavu strojního zařízení. Nejjednodušším způsobem, jak získat z časového signálu jednotlivé periodické děje, je rozklad na soubor harmonických funkcí, které se liší amplitudou, úhlovou frekvencí a svou počáteční fází. Takový rozklad nazýváme Rychlou Fourierovou transformací. Patří mezi nejpoužívanější vibrační analýzy a je významným pomocníkem v diagnostice strojních zařízení.

Skládání časového signálu je zřejmé z obr. 3-9. V dolní levé části je původní časový signál, skládající se z celé řady periodických dějů. Dominantním je zpravidla signál od nevyváženosti, který se obvykle pohybuje na úrovni otáčkové frekvence. Druhý signál pochází od závad v ložisku, ve frekvenčním spektru je viditelný uprostřed. Posledním, třetím signálem, jsou zubové frekvence.



Obr. 3-9 Skládání časového signálu a frekvenční spektrum [4]

## 3.2 Tribodiagnostika

Při tvorbě této kapitoly bylo čerpáno z literatury [3], [4].

Jedná se o metodu bezdemontážní diagnostiky, která využívá maziva, jako nositele informací o dějích probíhajících ve strojních zařízeních. Úkolem této diagnostické metody je podávat zprávu o výskytu cizích látek v mazivu. Taková informace není pouze kvantitativního charakteru, ale zároveň nám podává rozbor složení cizí látky. Vyhodnocením výsledků tribologického měření, jsme tedy krom upozornění na počínající závadu schopni lokalizovat i místo vzniku.

Způsob, jakým je v tribodiagnostice sledováno opotřebení strojních částí, přesněji třecích uzlů, je založen na sledování obsahu otěrových částic v mazivu. V každém technickém systému, ve kterém je aplikováno mazivo, dochází k postupnému opotřebení třecích uzlů. Olej, který neustále cirkuluje v mazací soustavě, otěrové částičky strhává svým proudem a unáší dál mazací soustavou. Vhodným odebráním vzorků oleje je možné tyto částice zachytit a rozbořem určit jejich charakter, týkající se zejména množství, velikosti, tvaru a složení, jenž nám dále napomáhá v lokalizaci poruchy. Druhým sledovaným parametrem je vlastní degradace maziva, popisující jeho postupné znehodnocení, za přispění tepelně-oxidačních procesů nebo znečištění cizími látkami.

### 3.2.1 Metody tribodiagnostiky

Dle použitých metod dělíme tribodiagnostiku do dvou hlavních kategorií:

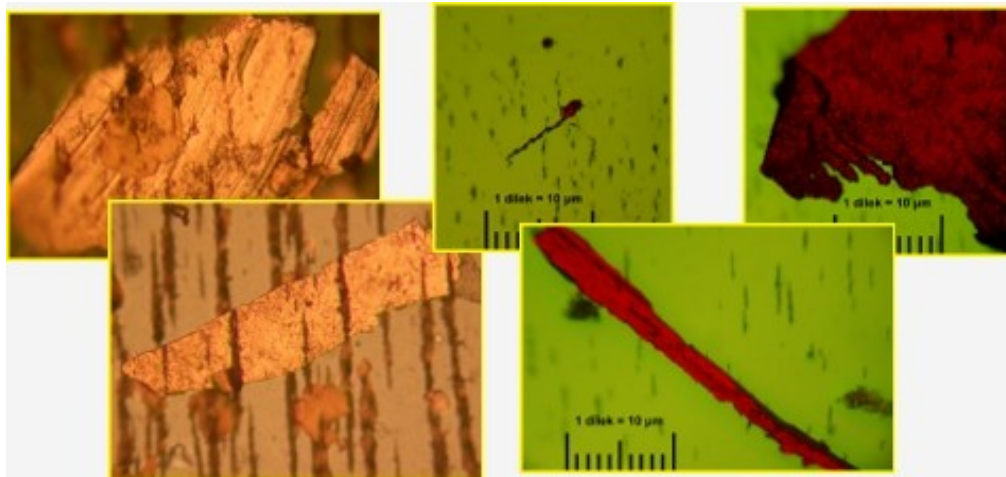
#### **Sledování technického stavu opotřebení strojních zařízení**

a) Metody stanovení koncentrace otěrových kovů:

- atomová spektrofotometrie
- atomová emisní spektrofotometrie
- atomová absorpční spektrofotometrie
- polarografie a volumetrie
- metoda RAMO

b) Metody pro hodnocení morfologie a distribučního rozdělení částic kovů

- částicová analýza nebo také ferrografie s vyhodnocením
  - feroskopickým
  - ferodenzometrickým



*Obr. 3-10 Ferrografická analýza otěrových částic separovaných z motorových olejů [16]*

**Sledování degradace maziva (aplikace testů)**

- kinematická viskozita
- bod vzplanutí
- obsah vody
- číslo alkality a kyselosti
- Conradsonův karbonizační zbytek
- kapková zkouška
- celkové znečištění
- mechanické nečistoty
- spektrální analýza olejů

## 4 Vřetena obráběcích strojů

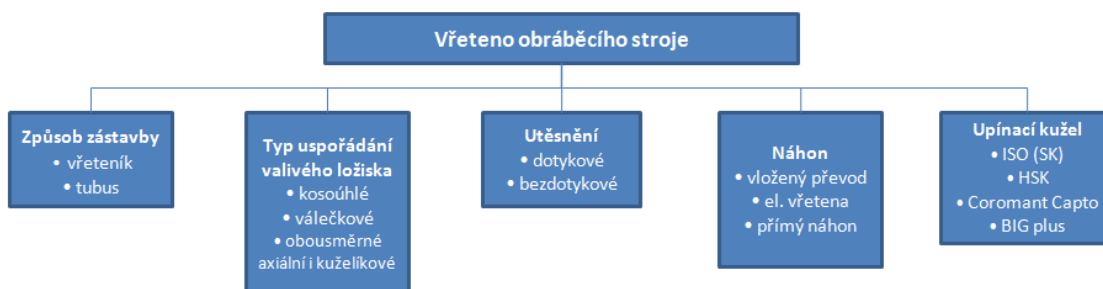
V této kapitole bylo využito literatury [7], [11], [12].

Jedním z nejdůležitějších konstrukčních prvků obráběcích strojů je vřeteno. Úkolem vřetene, je zajištění přesného otáčivého pohybu obrobku u soustruhu., resp. nástroje u frézky, brusky nebo vrtačky. Pro splnění podmínky přesného otáčivého pohybu, je nutné dodržet povolené mezní odchylky dráhy jednotlivých bodů obrobku, či nástroje od referenční kružnice.

Uložení obráběcího vřetene je staticky určité, obvykle ve dvou radiálních a v jednom, popř. dvou ložiskách axiálních. Část vřetene, která slouží pro upnutí obrobku nebo nástroje, nazýváme předním koncem vřetene. Rovněž ložiska v blízkosti předního konce vřetene, označujeme předními nebo hlavními ložisky. Hlavní jsou z toho důvodu, jelikož mají největší podíl na přesnosti otáčivého pohybu.

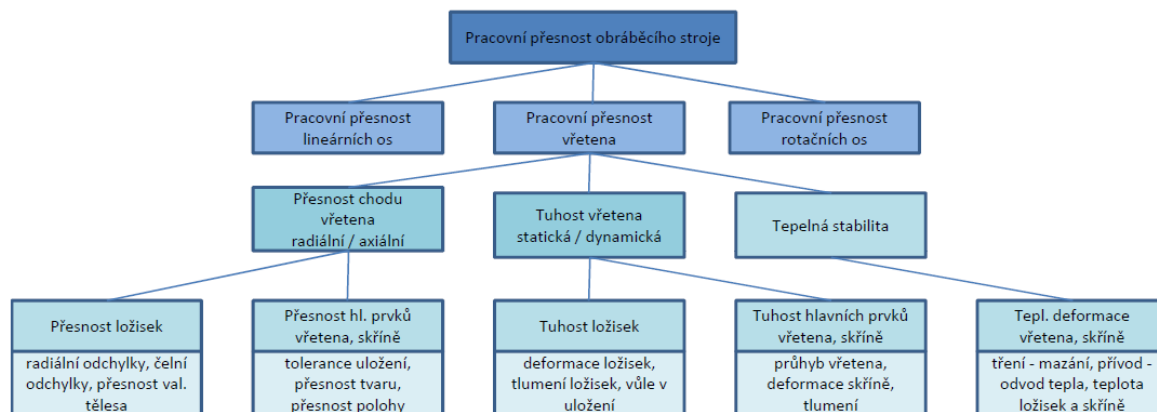
Na vřetena obráběcích strojů jsou kladeny tyto požadavky:

- vysoká přesnost chodu – její míru určuje radiální a axiální házení
- dokonalé vedení – je splněno za podmínky, že vřeteno nemění svou polohu v prostoru, dojde-li ke změně směru a smyslu zatížení
- minimální ztráty v uložení – jak při změně polohy, tak účinkem tepelné dilatace
- tuhost (předeprnutí vřetene) – deformace vřetene a přesnost chodu nejvíce ovlivňují výslednou přesnost obrábění
- možnost vymezení vůle v případě postupného opotřebení
- dlouhodobá životnost a provozní spolehlivost



Obr. 4-1 Skladba vřetene [7]

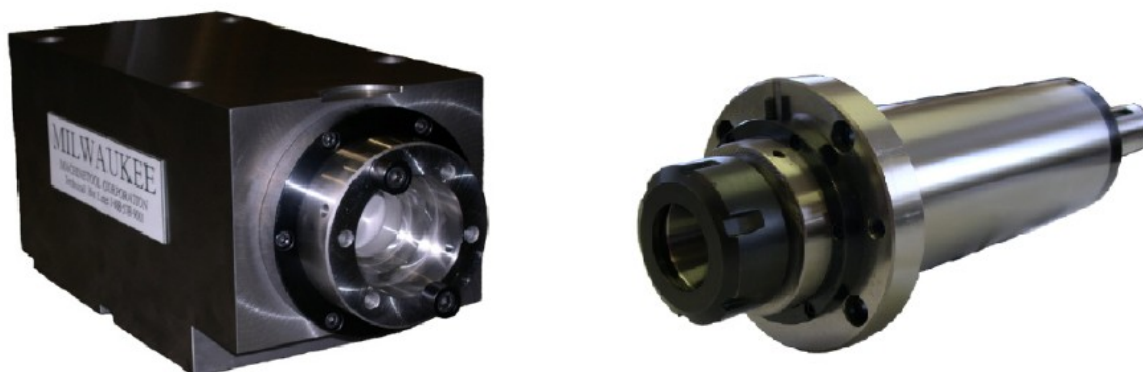
Přesnost výrobního stroje, je společně s produktivitou hlavním ukazatelem hodnocení kvality stroje. Pracovní přesnost rozhodujícím způsobem ovlivňují právě výše zmíněnými parametry. Veškeré faktory ovlivňující přesnost obráběcího stroje jsou uvedeny v obr. 4-2. Je patrné, že na konstrukci vřetene je třeba klást nejvyšší požadavky.



Obr. 4-2 Faktory ovlivňující přesnost obráběcích strojů [7]

V konstrukci vřetene, rozlišujeme dva základní druhy zástavby vřetena do nosné struktury neboli vřeteníku stroje. Jedná se o uložení:

- a) do tělesa skříňového tvaru
- b) do tubusu



Obr. 4-3 Uložení vřetena do skříně (vlevo) a do tubusu (vpravo) [11]

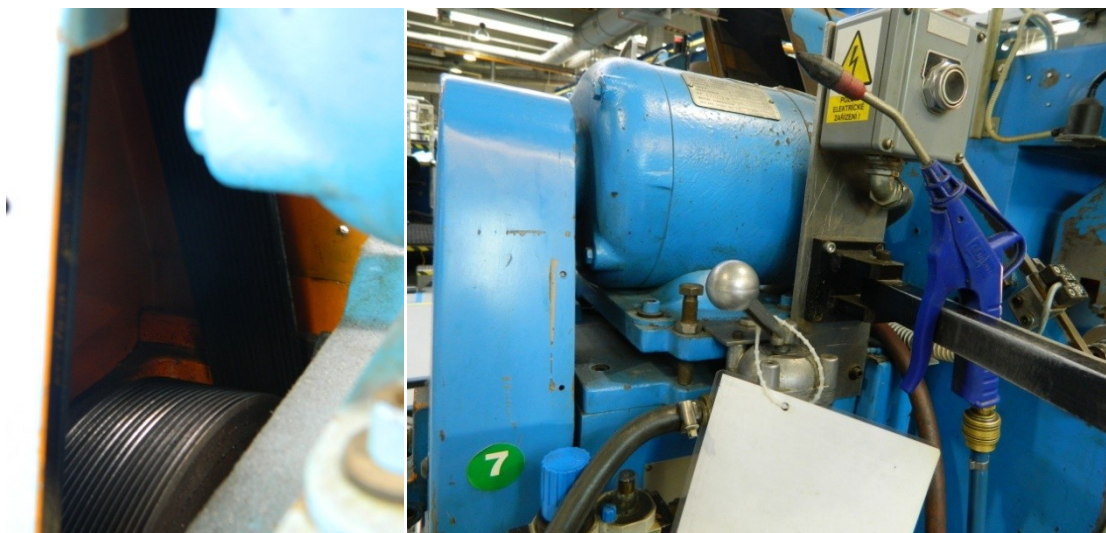
## 4.1 Náhon vřeten

Pohon vřeten je možné realizovat následujícími způsoby:

a) vloženým převodem

- řemenem
- ozubenými koly
- převodovkou

Vřeteno, které má pohon řešen za pomoci řemene, dokáže přenést menší krouticí moment, na druhou stranu má výhodu ve schopnosti tlumit rázy a kmity vznikající jak při rozběhu motoru, tak při samotném obrábění. Dokonalé tlumení vibrací je požadováno zejména u broušení, kde dosahujeme nejvyšší kvality obráběného povrchu.



*Obr. 4-4 Náhon vřetene řemenem u brusky Cincinnati Milacron Heald 273A*

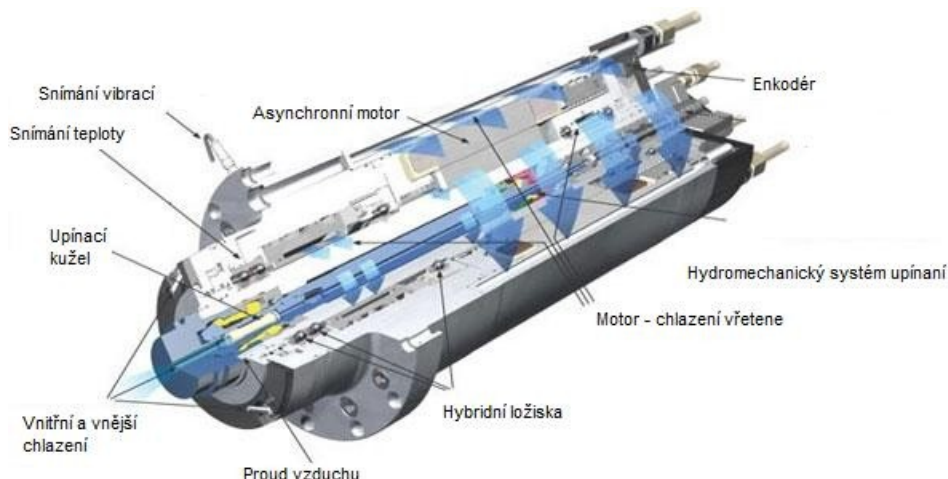
Pohon realizovaný ozubenými koly, popř. převodovkou, umožňuje přenos velkého krouticího momentu. U převodovky je zároveň možné využití vysokých převodových poměrů. Nevýhodou v porovnání s pohonem pomocí řemene je bezesporu vyšší hmotnost, hluchnost, ale také výskyt rezonance na hranici kritických otáček. Stroje s tímto druhem pohonu nachází ve strojírenství univerzální uplatnění.

b) přímým náhonem

- servomotorem
- spojkami
- elektrovřeteno



Vřetena s přímým náhonem jsou využívána pro aplikace vysokorychlostního obrábění (HSC) a to zejména z důvodu vysoké dynamické stability. Konstrukce elektrovřetena je navržena jako kompaktní – rotor elektromotoru je nalisován přímo na vřeteno. Vnější plášť pak tvoří vinutí spolu s chlazením. Toto konstrukční uspořádání umožňuje variabilitu ve volbě otáček, bez přenášení vibrací do vřetene. Elektrovřetena jsou provozována jak se synchronními, tak s asynchronními motory.



*Obr. 4-5 Řez elektrovřetenem [13]*

## 4.2 Vřetenová ložiska

Vřetena obráběcích strojů jsou až na některé výjimky valivě uložena. Výjimku tvoří pouze zlomek obráběcích zařízení, využívající ložiska hydrodynamická nebo hydrostatická. Valivá ložiska jsou zatěžována kombinací sil radiálních a axiálních, ve většině případů při velmi vysokých otáčkách.

Při konstrukci vřetene a volbě jeho ložisek, je na jedné straně řešena tuhost a na straně druhé možnost zástavbového prostoru. Obecně užívané pravidlo upřednostňuje pro uložení s nejmenší únosností ložiska s kosoúhlým stykem. Pro největší uložení jsou naopak volena ložiska kuželíková. Válečková ložiska leží na pomyslném středu mezi zmíněnými druhy uložení.

Mezi hlavní požadavky na ložiska vřeten patří:

- tuhost
- přesnost
- malé pasivní odpory – vlivem oteplení
- spolehlivost
- možnost vymezování ložiskové vůle
- odolnost proti opotřebení
- klidný chod

Převládajícím materiálem pro výrobu ložisek je speciální ocel. Moderním trendem je využití ložisek hybridních, které používají keramické valivé elementy  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Použitím keramickým materiálů dosahujeme u valivých elementů daleko menších hmotností, než je tomu u ložisek ocelových. Přináší to výhodu zejména u odstředivých sil, které nedosahují tak vysokých hodnot, ale také v menší tepelné vodivosti, díky které nedochází k přenosu tepla mezi vnitřním a vnějším kroužkem. Hybridní ložiska nacházejí uplatnění zejména u obrábění, kde je požadováno velmi vysokých otáček.

Vlastnost	$\text{Si}_3\text{N}_4$	Ocel
hustota [ $\text{g.cm}^{-3}$ ]	3,19	7,8
teplotní délková roztažnost [ $10^{-6} \cdot \text{C}^{-1}$ ]	3,2	11
modul pružnosti [ $\text{kN.mm}^{-3}$ ]	315	210
teplotní vodivost [ $\text{W.m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ]	30-40	40-50
odpor [ $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ]	$10^{17}$	$10^{-1}$
limitní teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]	1000	300
tvrdost HV10	1700	700

Tab. 4-1 Porovnání vlastností keramických a ocelových ložisek [7]

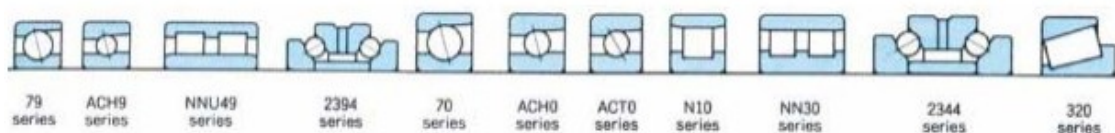
#### 4.2.1 Valivá ložiska a jejich uspořádání

Užití valivých ložisek ve vřetenech obráběcích strojů, je dáno zejména jejich mírou tuhosti, kterou je možné zároveň zvýšit předepnutím. Valivá ložiska mají velmi nízký koeficient tření a z toho vyplývající malé ztráty přenášeného výkonu.

Mají vysokou únosnost i při nízkých otáčkách. Z hlediska údržby je nespornou výhodou snadná demontáž. Negativem tohoto typu ložisek je vyšší citlivost na rázy, absence tlumení kmitání a v neposlední řadě také vyšší cena, v porovnání s ložisky kluznými.

Ve vřetenech se v závislosti na jejich aplikaci užívají tato ložiska:

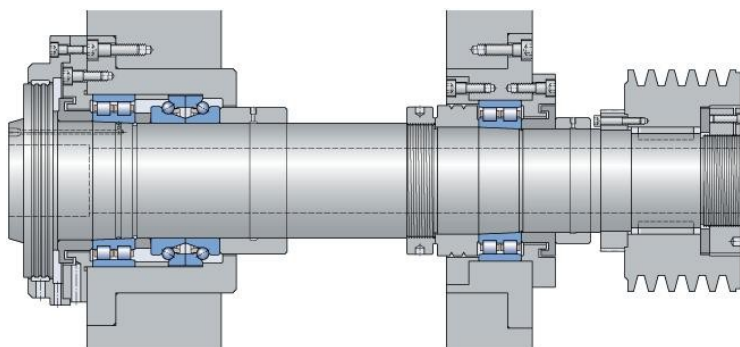
- kuličková s kosoúhlým stykem
- válečková (jednořadá, dvouřadá)
- kuželíková
- jehlová



*Obr. 4-6 Používaná ložiska ve vřetenech obráběcích strojů [7]*

V konstrukci vřeten obráběcích strojů je možné pozorovat různé druhy uspořádání ložisek. V následujícím textu a obrazové příloze jsou uvedeny základní typy uspořádání dle předního radiálního ložiska.

#### **Uložení s dvouřadým válečkovým ložiskem**

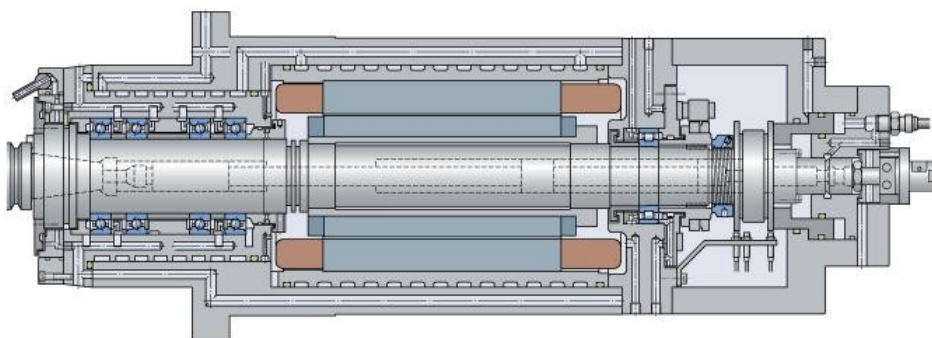


*Obr. 4-7 Uložení s dvouřadým válečkovým ložiskem [10]*

Charakteristika [%]				
Axiální tuhost	Radiální tuhost	Otáčky	Přesnost	Radiální zatížení
100	100	100	100	100
<b>Použití</b>	soustruhy, frézky, vrtačky, obráběcí centra			

Tab. 4-2 Charakteristika uložení s dvouřadým válečkovým ložiskem [7]

#### Uložení v ložiskách s kosoúhlým stykem

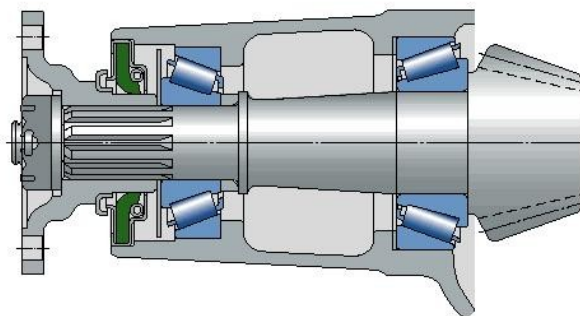


Obr. 4-8 Uložení v ložiskách s kosoúhlým stykem [10]

Charakteristika [%]				
Axiální tuhost	Radiální tuhost	Otáčky	Přesnost	Radiální zatížení
57	85	155	160	100
<b>Použití</b>	soustruhy, frézky, obráběcí centra			

Tab. 4-3 Charakteristika uložení v ložiskách s kosoúhlým stykem [7]

## Uložení v ložiskách kuželíkových



Obr. 4-9 Uložení v ložiskách kuželíkových [10]

Charakteristika [%]				
Axiální tuhost	Radiální tuhost	Otáčky	Přesnost	Radiální zatížení
120	120	100	90	100
<b>Použití</b>	velké soustruhy, obráběcí centra			

Tab. 4-4 Charakteristika uložení v ložiskách kuželíkových [7]

### 4.2.2 Mazání vřetenových ložisek

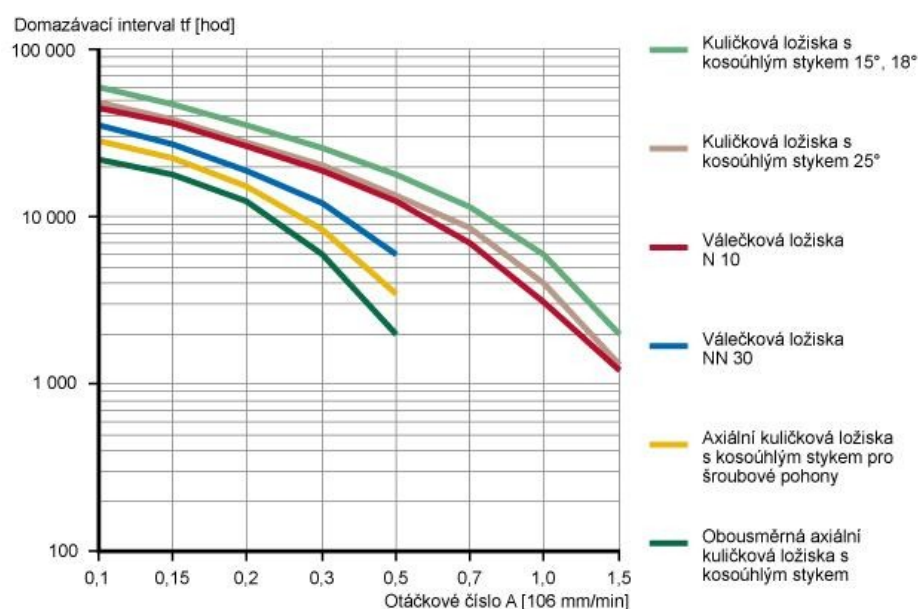
Důvodem pro mazání ložisek, je redukce tření, které vzniká v důsledku kontaktu valivých elementů s vnitřním a vnějším kroužkem. Redukce tohoto tření snižuje opotřebení ložisek a v konečném důsledku tedy i zvyšuje jejich životnost. Mezi důležité, kladné vlastnosti mazání patří také odvod nežádoucího tepla.

Rozlišujeme dva základní druhy mazání ložisek, dle použitého maziva:

- a) mazání plastickým mazivem (tukem)
  - jednorázové (nanášení ručně při montáži)
  - mazací patrony

Mazání plastickým mazivem patří mezi nejjednodušší a hojně využívaný způsob mazání. Mazivo neboli tuk se skládá z 90% z minerálního nebo ropného oleje, zbývajících 10% objemu tvoří zahušťovadlo. Zahušťovadlo je zastoupeno vápenatým, sodným, lithným, popř. barnatým mýdlem.

Množství plastického maziva, potřebného pro konkrétní druh ložiska, případně interval domazávání, je obvykle udáván výrobcem. Např. společnost SKF využívá pro určení intervalu domazávání diagram pro vysoce přesná ložiska. Tento diagram – viz obr. 4-10, je aplikovatelný za podmínek využití ložisek s ocelovými valivými tělesy, vodorovnou hřídelí, provozní teplotou nepřevyšující 70°C a za použití kvalitního plastického maziva s lithným zahušťovadlem. Rovněž životnost plastického maziva je zaručována výrobcem a to pro dané podmínky, jako jsou otáčky, teplota, typ ložisek a jejich zastavení.



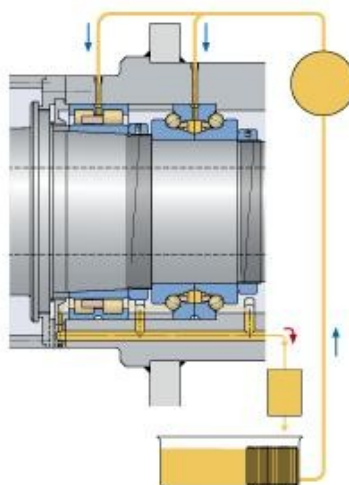
Obr. 4-10 Diagram s intervaly domazávání dle SKF [10]

#### b) mazání olejem

Mazání pomocí oleje obvykle užíváme v případech, kdy je nutné z třecích míst současně odvádět teplo a plastické mazivo není již pro tento účel dostačující. Obvykle je to u zařízení pracujících ve vysokých otáčkách a při značném zatížení.

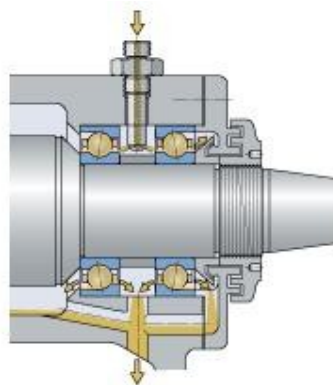
Existují tyto způsoby mazání olejem:

- Olejová lázeň (oil bath) – olej je unášen rotujícími částmi, rozptýlen v ložisku a poté odtéká zpátky do sběrného místa. Použití spíše pro zařízení s nízkými otáčkami.
- Nucený oběh (circulating oil) – pro zajištění nuceného oběhu je nutné použití čerpadla. Olej prochází ložiskem a do sběrného místa se vrací přes filtraci, která odloučí případné cizí částice a v některých případech přes chladič.



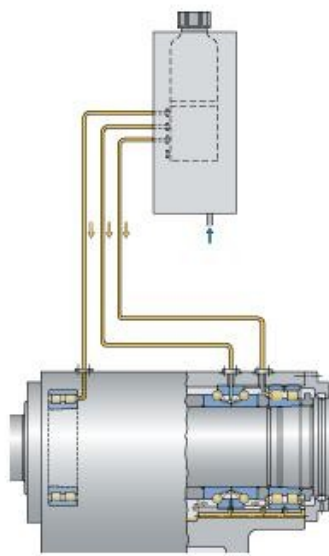
*Obr. 4-11 Mazání s nuceným oběhem [10]*

- Dávkování (oil drop) – ložisko je mazáno v daných intervalech přesnou dávkou oleje. Pro ověření proniknutí oleje do ložiska i při vysokých otáčkách je obvykle nutné provést zkoušku.
- Vstřikování (oil jet) – systém oil jet nachází své uplatnění zejména v zařízeních s provozem při vysokých otáčkách. Jak již napovídá název, olej je vstřikován pod tlakem a nasměrován ze strany ložiska. Důležitá je zejména rychlost proudu vstřikovaného oleje, která musí být dostatečně vysoká k překonání vzduchových vírů vyvolaných rotací ložiska.



*Obr. 4-12 Mazání vstřikováním oleje [10]*

- Olejová mlha (oil mist) – rozptýlování drobných kapek oleje (1 - 5 $\mu$ m) do suchého vzduchu.
- Olej – vzduch (oil – air) – k přenosu malého, přesně odměřeného množství oleje ve formě kapek, je používáno stlačeného vzduchu. Olej je přímo k ložisku dopravován pomocí trysky. Sekundární funkcí vzduchu je snižování teploty ložiska, ale také vytváření přetlaku, který zamezuje proniknutí nečistot do prostoru ložiska.



*Obr. 4-13 Systém mazání olej-vzduch [10]*



## 5 Aplikace technické diagnostiky v Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o.

V této části práce se věnuji praktickému využití vybraných metod technické diagnostiky v Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. Jednotlivé podkapitoly praktické části popisují vybrané stroje, na kterých byla aplikována technická diagnostika, rozbor měření a závěrečné vyhodnocení nasbíraných dat.

### 5.1 Historie a současnost Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o.

V této podkapitole bylo čerpáno z literatury [18].

Historie letecké výroby v Hlubočkách - Mariánském Údolí, je psána již od roku 1951. V té době byla založena tzv. letecká speciálka, odnož mateřského závodu Mora Moravia, známého výrobou kuchyňských spotřebičů. V 50. letech, se v tomto závodě vyráběly žárové dílce pro proudový motor M 05 (MiG 15). Později, v 60. a 70. letech, části motorů M701 (L-29), AI25 (L-39), DV-2 (L-59) a zřejmě nejznámější motor české výroby - turbovrtulový M601 (L-410), kterého bylo vyrobeno tisíce kusů a dodnes létá po celém světě.

V 90. letech, došlo z důvodu rozpadu východního trhu k útlumu výroby. Letecká výroba se oddělila od svého mateřského závodu, pod názvem Mora Aerospace, a.s. Došlo k navázání spolupráce s americkou firmou Allied Signal (dnes Honeywell International Inc.) a v roce 2002, je již tato nadnárodní společnost majitelem leteckého závodu v Hlubočkách. Honeywell Aerospace Olomouc, s.r.o. dále pokračuje v úspěšné historii, výrobou statických částí leteckých motorů - spalovacích komor, plamenců, difusorů, apod.



Obr. 5-1 Ukázka výroby v Honeywell Aerospace Olomouc [18]

## **5.2 Údržba v Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o.**

Výroba leteckých motorů vyžaduje celou řadu speciálních technologií. Výrobní závod Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o., tedy disponuje nejen zařízením určeným k běžnému třískovému obrábění, jako jsou obráběcí centra, CNC soustruhy, brusky, ale také vybavením pro speciální procesy. Mezi ty patří např. chemické linky, lasery, zařízení pro žárové nástřiky, pece, svařovací automaty apod.

Pro výše uvedené je možné zajištění údržby rozdělit na:

- interní – zajišťována interním oddělením údržby
- externí – údržba vyčleněna externím partnerům

Interním oddělením údržby jsou zajišťovány práce na plánovaných preventivních prohlídkách a neplánované, reaktivní údržbě, týkající se mechanických závad strojů a zařízení.

Externě, avšak přímým zastoupením dodavatelů ve výrobním závodě Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o., je zabezpečeno odstraňování poruch na elektrickém vybavení, včetně závad na řídicích systémech obráběcích strojů (fa. Siemens) a olejové hospodářství (fa. Receo). Mezi další externí úkony údržby, patří některé kroky plánované - prediktivní údržby, jako je vibrační diagnostika včetně obráběcích strojů, kontrola geometrické přesnosti, údržba a odstraňování závad zařízení určených pro speciální procesy (plasmové nástřiky, chemické linky) apod. Služby tohoto druhu, jsou objednávány u smluvních dodavatelů, kteří dojíždí do pobočky Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o.

### 5.3 Návrh technické diagnostiky pro vybrané stroje

Pro praktickou aplikaci technické diagnostiky jsem si vybral dvě stejná obráběcí centra. V obou případech se jedná o horizontální, více-osé obráběcí centrum Mitsui Seiki HS5A, využívané pro nejrůznější aplikace obrábění rozměrných, tvarově i technologicky složitých součástí, ze slitin titanu, nerezových ocelí a dalších materiálů využívaných v leteckém průmyslu.

Na obou zmíněných strojích byla provedena jak vibrodiagnostika vřetene, tak odběr vzorků oleje pro vyhodnocení v tribologické laboratoři.

#### 5.3.1 Popis a specifikace vybraných strojů

Technické informace o strojích byly čerpány ze zdroje [18].



*Obr. 5-2 Obráběcí centrum Mitsui Seiki HS5A umístěné v závodě HAO*

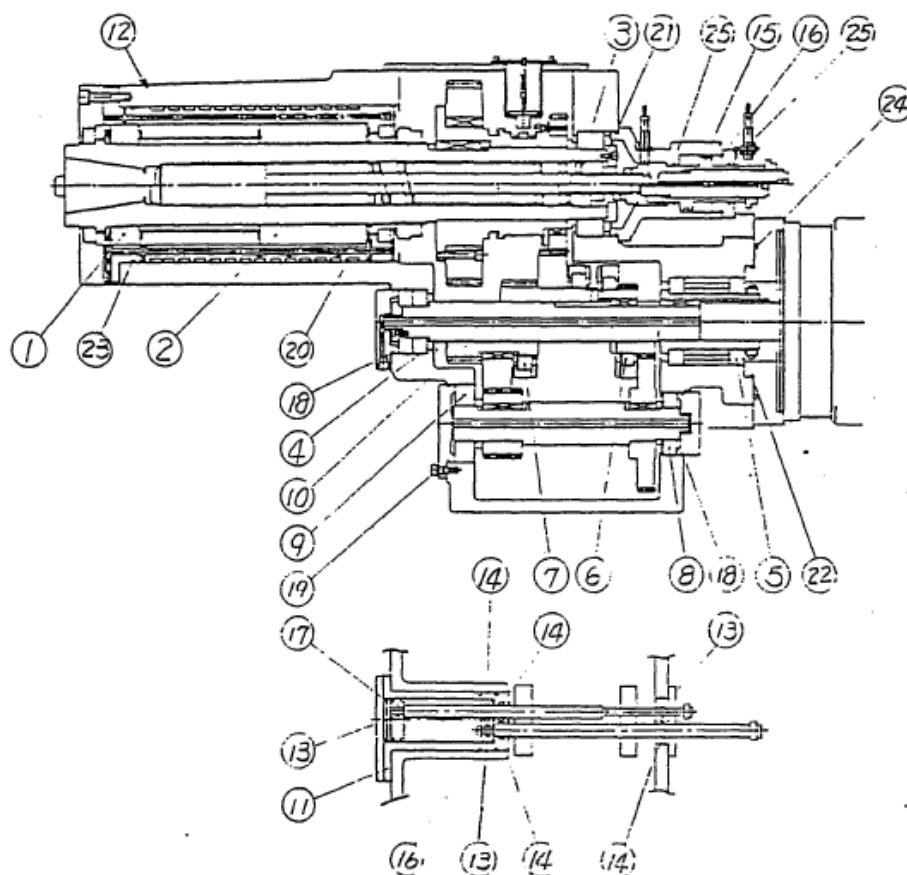
Technické údaje	
Typ a model	Horizontální obráběcí centrum Mitsui Seiki HS5A
Výrobce / Rok výroby	Mitsui Seiki Kogyo CQ, LTD Japan / 1995
Řídicí systém	FANUC 11M
Rozsah otáček vřetene [ot/min <sup>-1</sup> ]	15 - 4500
Rychlost posuvu [m/min]	18
Dráhy pojezdu pro osy X / Y / Z [mm]	850 / 700 / 750
Výkon motoru vřetene [HP]	20
Upínací kužel	ISO

*Tab. 5-1 Základní technické údaje obráběcího centra Mitsui Seiki HS5A [18]*

#### **Popis vřetena – náhon, zástavba**

Jak již bylo zmíněno v tabulce technických údajů, jedná se o horizontálně umístěné vřeteno s konstrukcí tzv. uložení do tubusu. Vřeteno splňuje požadavky pro široké spektrum řezných podmínek, při vysokých otáčkách. Maximální točivý moment je 100 kg/m. K dosažení těchto podmínek jsou otáčky vřetene rozděleny do tří pásem, s využitím převodového soukolí. Pásma jsou označena terminologií vycházející z anglického jazyka low (nízké), medium (střední) a high (vysoké). Každé z pásem je omezeno horní hranicí otáček, s hodnotou 414 ot/min pro low, 1683 ot/min pro medium a 4500 ot/min pro pásmo high.

Na následujícím obrázku je patrný schematický řez vřetenem, z údržbového manuálu Mitsui Seiki. Pozice 1, 2 a 3 označují vřetenová ložiska.



Obr. 5-3 schematický řez vřetenem obráběcího centra Mitsui Seiki HS5A [18]

### Ložiska vřetene – typ a uložení

Uložení ložisek kombinuje dvě dvouřadá válečková ložiska s jedním kuličkovým s kosoúhlým stykem.

Part No. Designation	Type	Manufac- turer Q'ty	Mounted to
1020606634470 Double row roller bearing	NN3017MBK	NSK 1	Spindle
1020606644470 Angular ball bearing	7020CTY	NSK	
1020606624470 Double row roller bearing	NN3020MBK	NSK 1	Spindle

Obr. 5-4 Přehled součástí pro údržbu – ložiska vřetene z manuálu Mitsui Seiki [18]

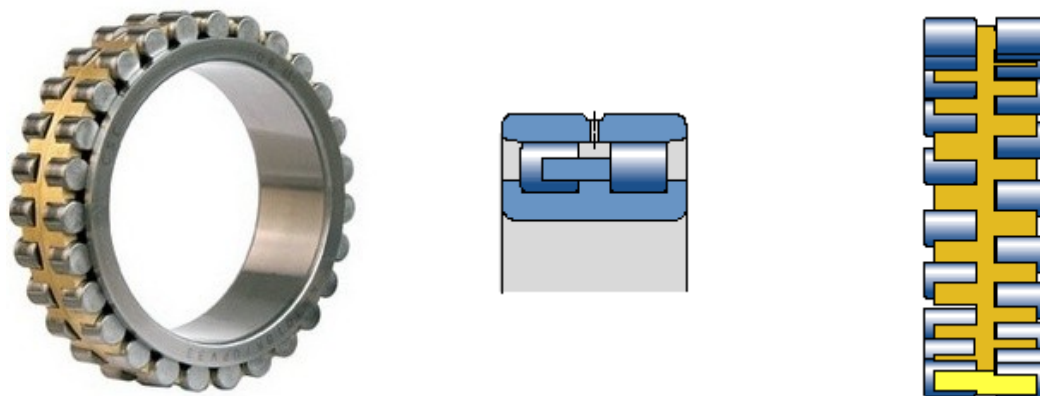
Ložisko v blízkosti konce vřetene u nástrojové hlavy je dvouřadé, válečkové, katalogového označení NN 3020 MBK. Druhé válečkové ložisko, rovněž dvouřadé, je umístěné na opačném konci ve vřeteníku s označením NN 3017 MBK. Mezi těmito ložisky je uloženo kuličkové ložisko s kosoúhlým stykem a katalogovým číslem 7020 CTY.

Obě válečková ložiska jsou vybavena masivní mosaznou klecí, hřebenové konstrukce, vyráběné z lité nebo kované mosazi. Materiál klece je CW612N (CuZn39Pb2) dle EN 1652:1997. Kompletní materiálové složení klece je uvedeno v tabulce níže.

Fe	Ni	Al	Cu	Pb	Sn	Další	-
max 0,3	max 0,3	max 0,05	59 - 60	1,6 – 2,5	max 0,3	total 0,2	Zn - zbytek

*Tab. 5-2 Materiálové složení ložiskové klece válečkových ložisek [17]*

Na následujících obrázcích je možné vidět konstrukci dvouřadého válečkového ložiska, spolu s masivní mosaznou hřebenovou klecí.



*Obr. 5-5 Dvouřadé válečkové ložisko zastavěné ve vřetenu obráběcího centra Mitsui Seiki [10]*

## 6 Vibrodiagnostika – podmínky měření, technické údaje

Měření obou zvolených strojů proběhlo ve třech termínech, s přibližně měsíčním odstupem. Každé z měření bylo realizováno jako tzv. pochůzkové, dle podmínek uvedených níže. Stroje jsou vedeny pod tzv equipment number“, zkr. eq.n., což je jedinečné, 10místné číselné označení pro každý stroj. Pod těmito čísly byly také pro jednodušší orientaci vedeny všechny údaje získané z měření.

### Měřicí přístroj

Pro měření vibrací vřeten byl využit analyzátor Adash A4400 Analyser VA4 Pro. Přístroj disponuje jak rekordérem měřených signálů, datakolektorem, tak základním modulem analyzátoru. Dále přístroj umožňuje provozní vyvažování strojů, měření rozběhů a doběhů, akustická měření, rázové testy a kontrolu mazání. Přístroj je svým určením velice vhodný pro komplexní servisní a inspekční činnost.



*Obr. 6-1 Analyzátor Adash A4400 VA4 PRO se zapojením třech kanálů*

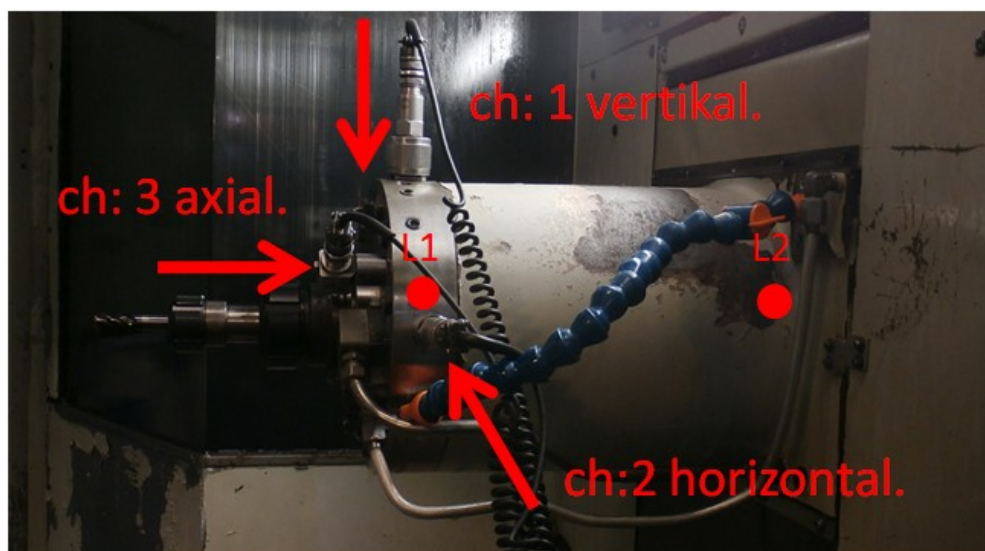
<b>Procesor</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intel Atom 1,6 GHz</li> </ul>
<b>Vstupní kanály</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 4AC, ICP napájení (0/1)</li> <li>• 4DC pro procesní veličiny</li> <li>• 1 TACHO pro externí spouštění</li> </ul>
<b>AD převodník</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 24 bitů, 64 bitů zpracování signálu</li> </ul>
<b>Frekvenční rozsah</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• max. 90 kHz (1 kanál, 196 kHz vzorkování)</li> <li>• max. 25 kHz (4 kanály, 64 kHz vzorkování)</li> <li>• min. 25 Hz (4 kanály, 64 Hz vzorkování)</li> </ul>
<b>Způsob vzorkování</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• plně synchronní pro 4 kanály</li> </ul>
<b>Zpracování dat</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• FFT v reálném čase</li> <li>• ENVELOPE analýza</li> <li>• ACMT – analýza pomaloběžných ložisek</li> <li>• řadová analýza</li> <li>• uživatelské definice pásem</li> <li>• měření RPM</li> <li>• měření DC (procesních veličin)</li> <li>• měření orbit</li> </ul>
<b>Napájení</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• bateriové – 5 hod. provozu, AC 230 V</li> </ul>
<b>Rozměry</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 230 x 140 x 60 mm, hmotnost 2200 g</li> </ul>

*Tab. 6-1 Základní technické parametry analyzátoru Adash A4400 VA4 PRO [19]*

### **Umístění měřících bodů, nastavené otáčky vřetene**

Body, ve kterých bylo měření realizováno, jsou patrné z obrázku níže. Bod L1 označuje konec vřetene směrem do pracovního prostoru. Bod L2 je potom na opačné straně směrem k vřeteníku. Dále jsou naznačeny směry, ve kterých bylo měření v bodě L1 a L2 provedeno. Jedná se o směr vertikální, horizontální a axiální.





Obr. 6-2 Umístění měřících bodů na vřetenu spolu se zapojenými snímači

Nastavené otáčky	<ul style="list-style-type: none"> <li>• měřeno při 500, 1000, 1500, 2000, 2500 3000 ot/min<sup>-1</sup></li> </ul>
Uchycení snímače	<ul style="list-style-type: none"> <li>• magnetické</li> </ul>
Zapojení kanálů	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3 – kanálové (horizontální, vertikální a axiální směr)</li> </ul>
Další údaje	<ul style="list-style-type: none"> <li>• provoz na prázdko bez zatížení</li> <li>• stroj č. 5100000406 byl při prvním měření měřen s upnutým nástrojem (nebylo umožněno měřit bez nástroje)</li> <li>• před měřením byla lokálně odstraněna odlupující se barva</li> </ul>

Tab. 6-2 Podmínky měření

## 6.1 Vyhodnocení naměřených dat

Vyhodnocení naměřených dat bylo provedeno v programu A4410 Virtual Unit. Naměřená data byla vyhodnocena při hladině 3000ot/min, kde bylo dosaženo nejvyšších hodnot jak rychlosti, tak zrychlení vibrací. Efektivní hodnoty rychlosti vibrací odpovídají frekvenčnímu pásmu 10 – 1000Hz, zrychlení odpovídá rozsah 500 – 25600Hz. Frekvenční spektra rychlosti vibrací jsou vyobrazena v pásmu 1 – 800Hz. Spektra zrychlení vibrací jsou v rozsahu 10 – 25600Hz.

### 6.1.1 Vyhodnocení měření Mitsui Seiki HS5A č. 5100000406

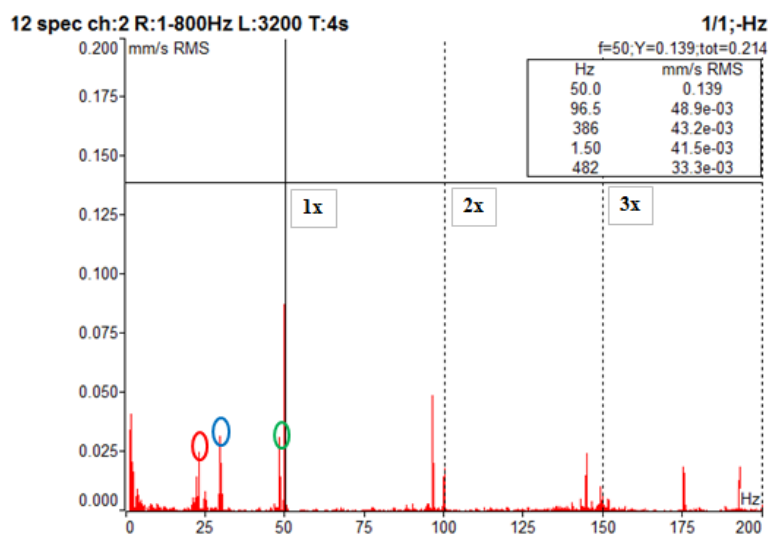
#### Měření č. 1 – 20. 1. 2015

V tabulce níže jsou uvedeny efektivní hodnoty rychlosti a zrychlení vibrací, v obou měřených bodech, při 3000 ot/min. Červeně jsou vyznačeny zvýšené hodnoty zrychlení vibrací v bodě L1, ve směru vertikálním a horizontálním. Rychlost vibrací je v obou měřených bodech na nízké úrovni.

RMS při 3000 ot/min	V <sub>e</sub> [mm/s]		a <sub>e</sub> [g]	
	L1	L2	L1	L2
ch: 1 - vertikál.	0,271	0,142	2,260	0,578
ch: 2 - horizontal.	0,261	0,122	1,120	0,642
ch: 3 - axial.	0,196	0,167	0,887	0,309

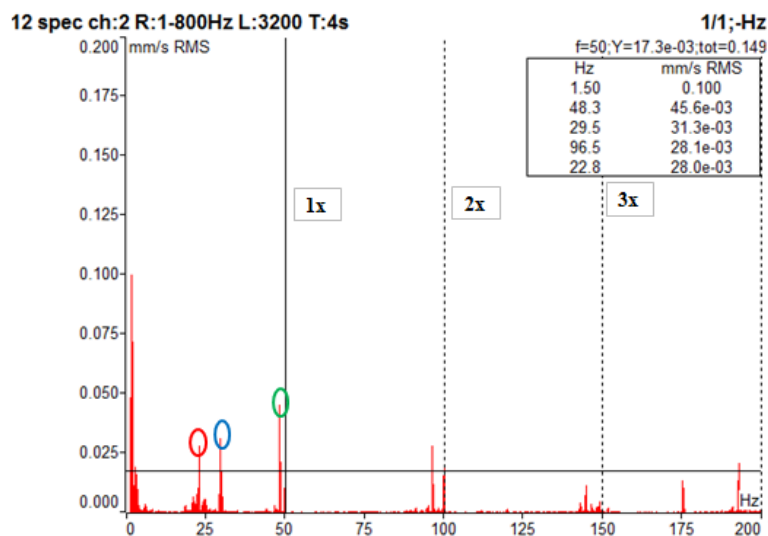
*Tab. 6-3 Efektivní hodnoty rychlosti a zrychlení vibrací  
(stroj č. 5100000406 / měření č. 1)*

Ve spektru rychlosti vibrací v bodě L1, je nejvýraznější amplituda na otáčkové frekvenci s harmonickými násobky. Druhou nejvýraznější amplitudou je frekvence označena zelenou elipsou na 48,25Hz, včetně harmonických násobků. Tato frekvence má pravděpodobně svůj původ v konstrukci ložiska, které je dvouřadé. Frekvence označena červenou elipsou, s hodnotou 22,75Hz a druhá, označena modrou elipsou s hodnotou 29,5Hz, jsou frekvence neznámé. Jejich původ by mohl být v počínajícím poškození ložiska.



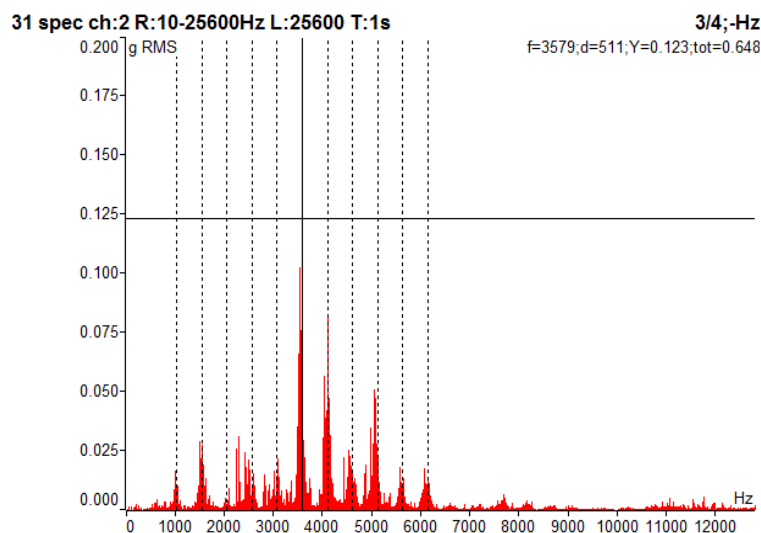
*Obr. 6-3 Spektrum rychlosti vibrací v bodě L1 v horizontálním směru  
(stroj č. 5100000406 / měření č. 1)*

Ve spektru horizontálního směru bodu L2, je opět zřetelně viditelná amplituda na frekvenci 48,25Hz, se svými harmonickými násobky. Frekvence 22,75Hz a 29,5Hz jsou viditelné i v bodě L2.



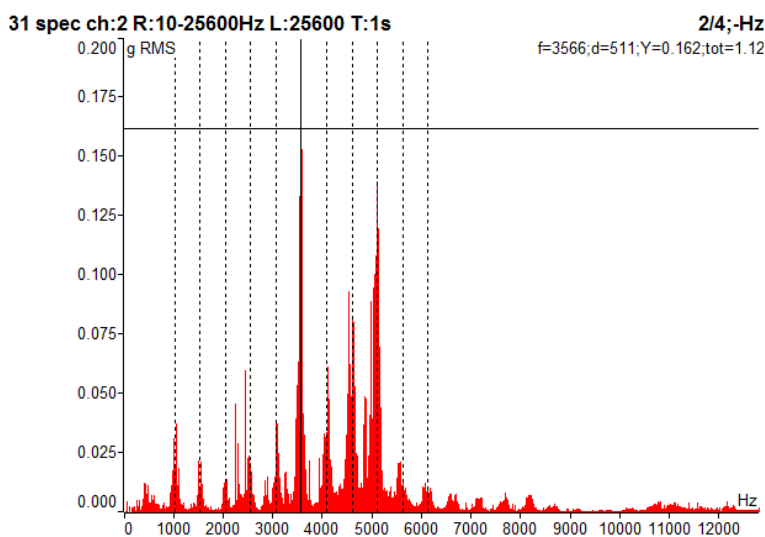
*Obr. 6-4 Spektrum rychlosti vibrací v bodě L2 v horizontálním směru  
(stroj č. 5100000406 / měření č. 1)*

Ve spektru zrychlení v bodě L2 je označena frekvence 3579Hz s harmonickými násobky o modulaci 511Hz.



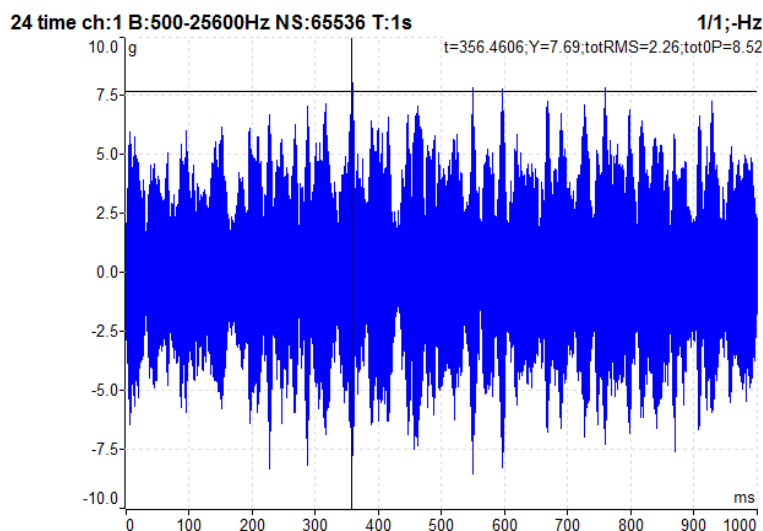
*Obr. 6-5 Spektrum zrychlení vibrací v bodě L2 v horizontálním směru  
(stroj č. 5100000406 / měření č. 1)*

V bodě L1 je viditelný stejný jev, jako v bodě L2. I zde se nachází výrazná amplituda na frekvenci 3566Hz, včetně harmonických násobků.



*Obr. 6-6 Spektrum zrychlení vibrací v bodě L1 v horizontálním směru  
(stroj č. 5100000406 / měření č. 1)*

V časovém signálu zrychlení vibrací, můžeme spatřit špičky na hranici 7g ve směru vertikálním v bodě L1. Prakticky stejné hranice zrychlení vibrací vykazuje i směr horizontální v tomto bodě. Dle grafického vyhodnocení i efektivních hodnot v tabulce je patrné, že v bodě L1 je počínající problém, s největší pravděpodobností v ložiskové kleci.



*Obr. 6-7 Časový signál zrychlení vibrací v bodě L1 ve vertikálním směru (stroj č. 5100000406 / měření č. 1)*

### **Měření č. 2 – 10. 3. 2015**

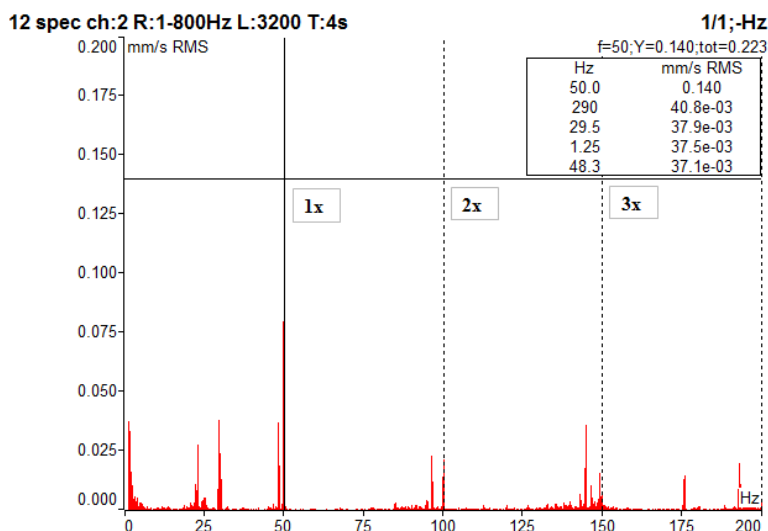
Druhé měření na stroji č. 5100000406 proběhlo za upravených podmínek. Vibrace na vřetení, byly měřeny jak s nástrojem, tak bez nástroje. Měření bez nástroje na tomto stroji nebylo při prvním měření umožněno. Efektivní hodnoty odpovídající měření bez nástroje, jsou uvedeny v závorkách.

Rychlost vibrací v bodě L1 a L2 je od posledního měření na stále dobré, vyhovující úrovni. Ve zrychlení vibrací je opět patrný výskyt zvýšených hodnot ve směru vertikálním i horizontálním. V porovnání s prvním měřením, je zrychlení vibrací ve směru vertikálním na nižší úrovni. V závorce uvedené hodnoty pro měření bez nástroje jsou rovněž zvýšené, avšak ve směru horizontálním, již pod hranicí 1g. Bod L2 je v efektivních hodnotách zrychlení na stále nízké úrovni, s nepatrnými odchylkami proti prvnímu měření.

RMS při 3000 ot/min	V <sub>e</sub> [mm/s]		a <sub>e</sub> [g]	
	L1	L2	L1	L2
ch: 1 - vertikál.	0,279 (0,233)	0,117 (0,090)	1,5 (1,02)	0,632 (0,615)
ch: 2 - horizontal.	0,252 (0,237)	0,124 (0,117)	1,13 (0,887)	0,729 (0,987)
ch: 3 - axial.	0,119 (0,230)	0,244 (0,206)	0,671 (0,508)	0,614 (0,480)

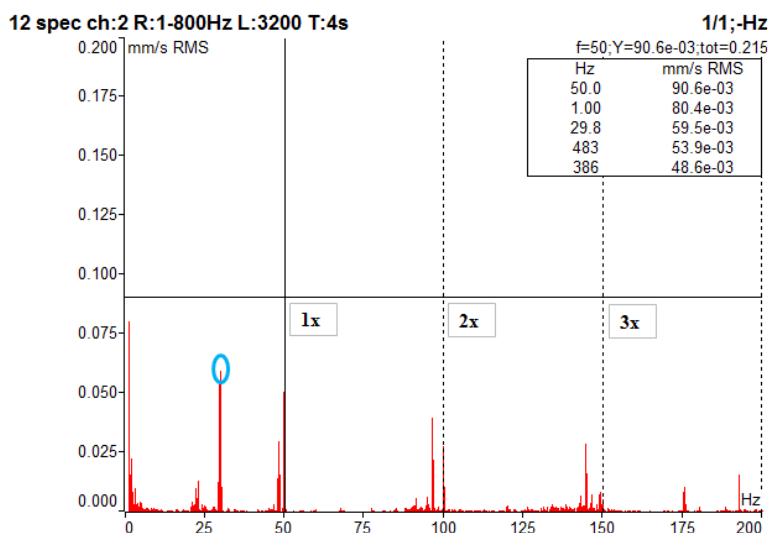
*Tab. 6-4 Efektivní hodnoty rychlosti a zrychlení vibrací (stroj č. 5100000406 / měření č. 2)*

Spektrum efektivní hodnoty rychlosti vibrací v bodě L1 v horizontálním směru, je od prvního měření s minimálními změnami. Ve spektru je opět patrná otáčková frekvence se svými harmonickými násobky. Dominantní jsou rovněž frekvence 29,75Hz a 22,75Hz, které byly viditelné i při prvním měření.



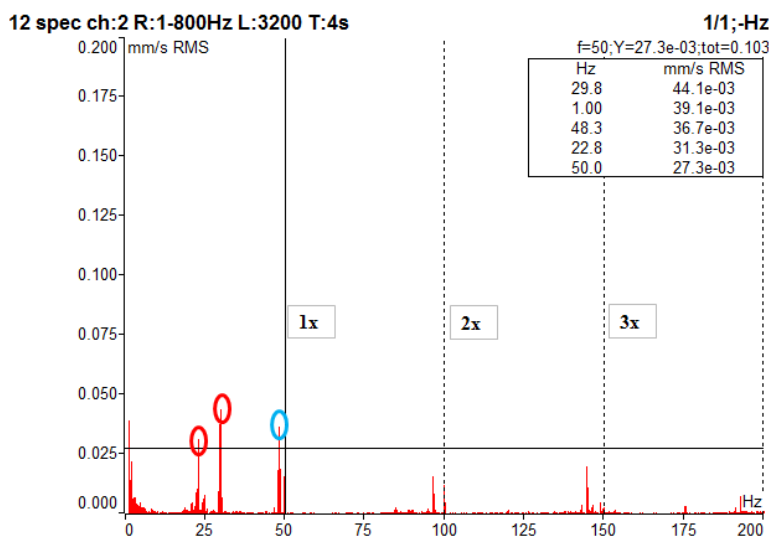
Obr. 6-8 Spektrum rychlosti vibrací v bodě L1 v horizontálním směru (stroj č. 5100000406 / měření č. 2)

Frekvence 29,8Hz v bodě L1, je výrazná i při měření v horizontálním směru bez nástroje. Avšak ve spektru odpovídající měření bez nástroje, je její amplituda větší, než vlastní otáčková frekvence. Stejnou skutečnost jsme mohli pozorovat i při měření č. 1 v bodě L2.



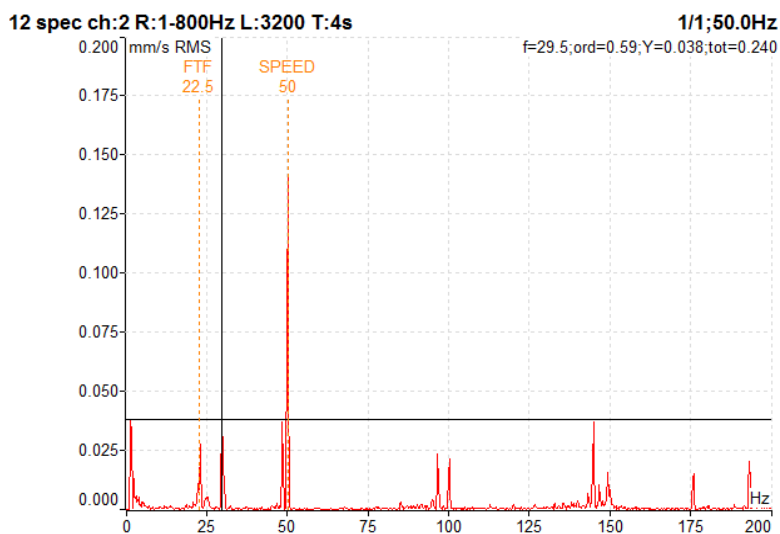
Obr. 6-9 Spektrum rychlosti vibrací v bodě L1 v horizontálním směru při měření bez nástroje (stroj č. 5100000406 / měření č. 2)

Výrazná špička na frekvenci 29,75Hz a 22,75Hz je viditelná také v bodě L2, v horizontálním směru, při měření s nástrojem.



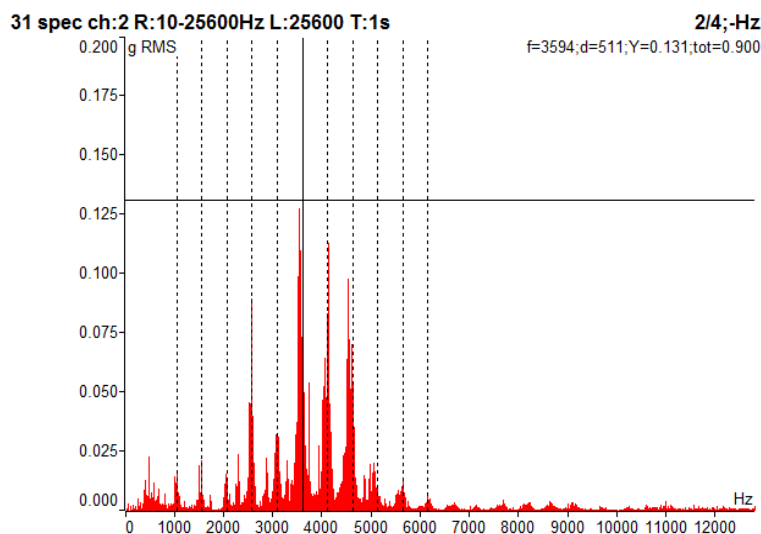
*Obr. 6-10 Spektrum rychlosti vibrací v bodě L2 v horizontálním směru (stroj č. 5100000406 / měření č. 2)*

Vyhodnocovací software Virtual Unit umožňuje výpočet a zobrazení poruchových frekvencí ložiska. Ve spektru efektivních hodnot rychlosti vibrací v bodě L1 horizontálního směru, je označena frekvence FTF na hodnotě 22,5Hz. Tato frekvence značí poškození ložiskové klece. Jiné poruchové frekvence poukazující na poškození valivých elementů, popř. problém vnitřního nebo vnějšího kroužku ložiska, nebyly ve spektru detekovány.



*Obr. 6-11 Spektrum rychlosti vibrací v bodě L1 v horizontálním směru s vyznačením poruchové frekvence ložiskové klece (stroj č. 5100000406 / měření č. 2)*

Ve spektru zrychlení v bodě L1 v horizontálním směru, při měření bez nástroje, je označena frekvence 3594Hz. Harmonické násobky se pohybují na hranici 511Hz.



*Obr. 6-12 Spektrum zrychlení vibrací v bodě L1 v horizontálním směru při měření bez nástroje (stroj č. 5100000406 / měření č. 2)*

### **Měření č. 3 – 21. 4. 2015**

Tabulka efektivních hodnot ve třetím měření zdůrazňuje zrychlení vibrací v bodě L1, ve všech třech směrech. Nárůst efektivních hodnot zrychlení je patrný zejména u měření bez nástroje, které je uvedeno v závorkách.

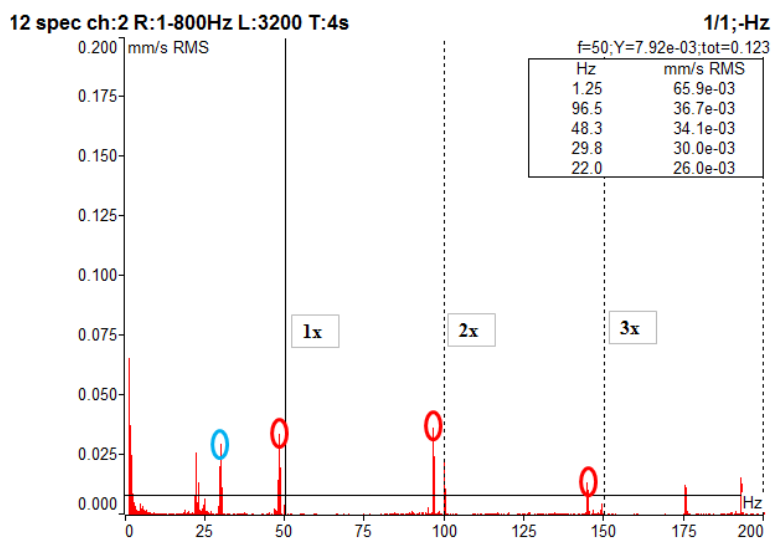
Již v průběhu druhého měření vzniklo podezření, zda problém viditelný ve spektrech tohoto stroje pochází skutečně z předních ložisek. Pro ověření bylo při třetím měření provedeno zároveň také měření motoru, pohánějícím vřeteno a měření převodovky. Toto měření bylo provedeno firmou ESOS Ostrava, s.r.o.

RMS při 3000 ot/min	V <sub>e</sub> [mm/s]		a <sub>e</sub> [g]	
	L1	L2	L1	L2
ch: 1 - vertikál.	0,272 (0,281)	0,1 (0,091)	1,7 (2,10)	1,78 (1,38)
ch: 2 - horizontal.	0,243 (0,227)	0,112 (0,106)	0,935 (1,48)	0,616 (0,540)
ch: 3 - axial.	0,282 (0,110)	0,27 (0,119)	0,793 (1,44)	0,787 (0,927)

*Tab. 6-5 Efektivní hodnoty rychlosti a zrychlení vibrací stroje č. 5100000406 (stroj č. 5100000406 / měření č. 3)*

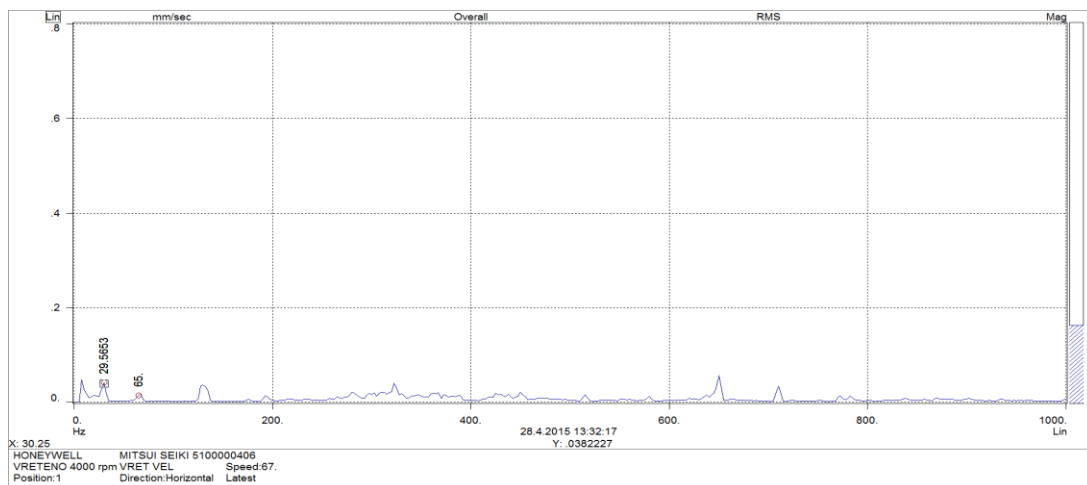


Ve spektru rychlosti vibrací v bodě L2, v horizontálním směru, při měření bez nástroje je dominantní otáčková frekvence na 50Hz s harmonickými násobky. Dále také frekvence 48,3Hz s harmonickými násobky, které svou amplitudou převyšují vlastní frekvenci otáčkovou na 50Hz. Jak již bylo zmíněno při prvním měření, tento fakt je pravděpodobně způsoben tím, že ložisko je konstruované jako dvouřadé. Výrazná je také první a třetí amplituda ve spektru. Frekvence 29,8Hz, označena modrou elipsou, se objevuje prakticky ve všech spektrech.



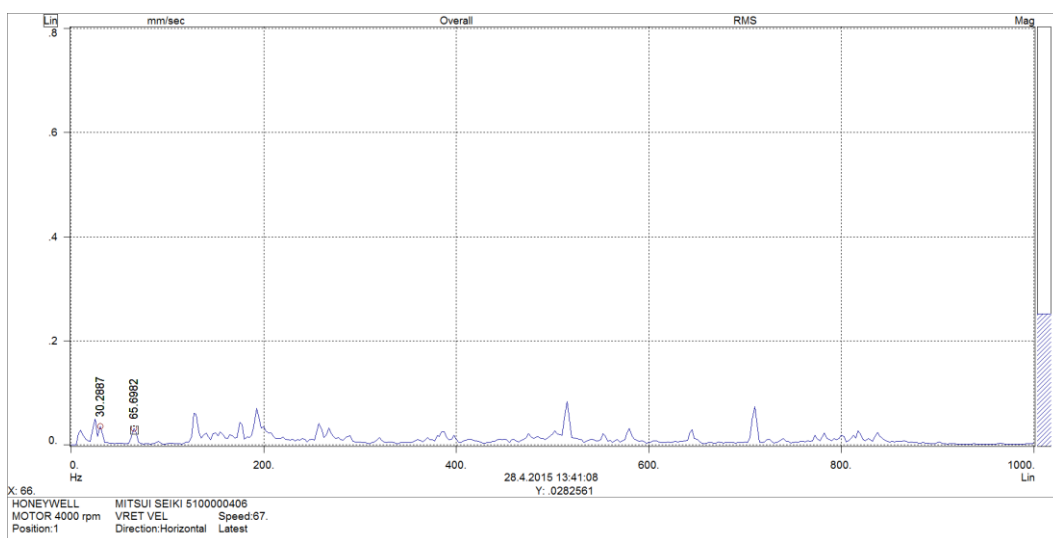
*Obr. 6-13 Spektrum rychlosti vibrací v bodě L2 v horizontálním směru při měření bez nástroje (stroj č. 5100000406 / měření č. 3)*

Ve spektru FFT rychlosti vibrací z protokolu firmy ESOS, s.r.o. je viditelná dominantní frekvence na 29,5653Hz a frekvence 65Hz, která představuje frekvenci otáčkovou. Rozdíl v otáčkové frekvenci je dán skutečností, že měření firmou ESOS, s.r.o. bylo realizováno při 4000 ot/min.



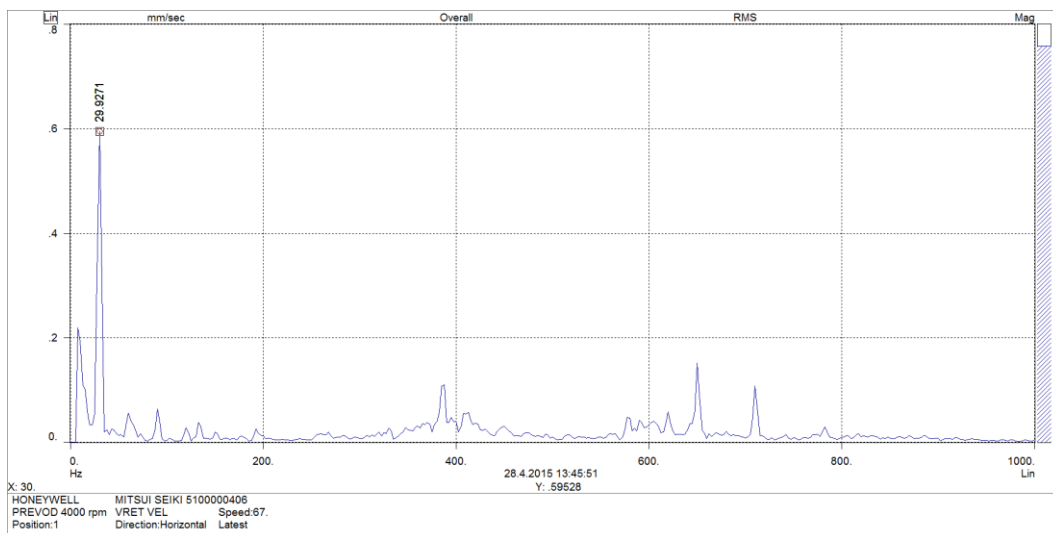
*Obr. 6-14 Spektrum rychlosti vibrací v bodě L2 v horizontálním směru  
(stroj č. 5100000406 / měření č. 3)*

Při podrobném studiu spektra rychlosti kmitání motoru, pohánějícím vřeteno, uvidíme stejně výraznou amplitudu na frekvenci 30,2897Hz.



*Obr. 6-15 Spektrum rychlosti vibrací motoru (stroj č. 5100000406 / měření č. 3)*

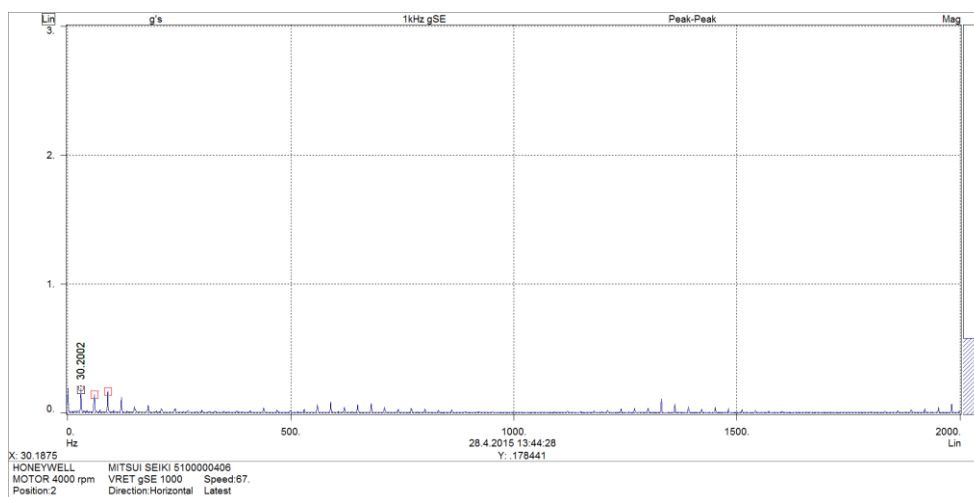
Naprosto stejný jev je patrný i v rychlosti kmitání na převodovce. V tomto případě je však amplituda frekvence 29,9271Hz nejvýraznější a dosahuje hodnoty rychlosti vibrací 0,6 mm/s. Je tedy zřejmé, že tato frekvence pochází z převodovky.



*Obr. 6-16 Spektrum rychlosti vibrací na převodovce  
(stroj č. 5100000406 / měření č. 3)*

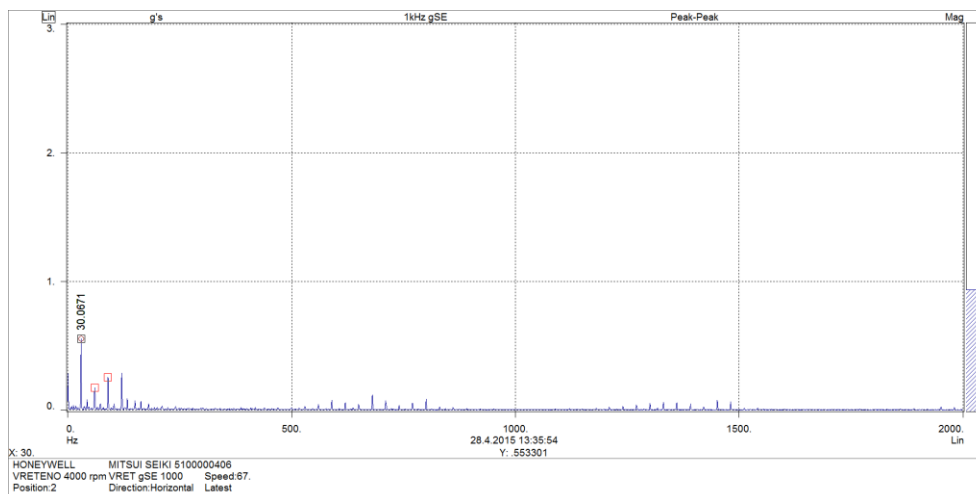
Pokud srovnáme spektra FFT zrychlení SE (Spike Energy) a to jednotlivě, pro motor, jeden z bodů na vřetení a převodovku, uvidíme přímou souvislost mezi jednotlivými spektry.

Spektrum FFT motoru pohánějícím vřeteno zvýrazňuje amplitudu na frekvenci 30,2002Hz a její harmonické násobky.



*Obr. 6-17 Spektrum zrychlení vibrací motoru (stroj č. 5100000406 / měření č. 3)*

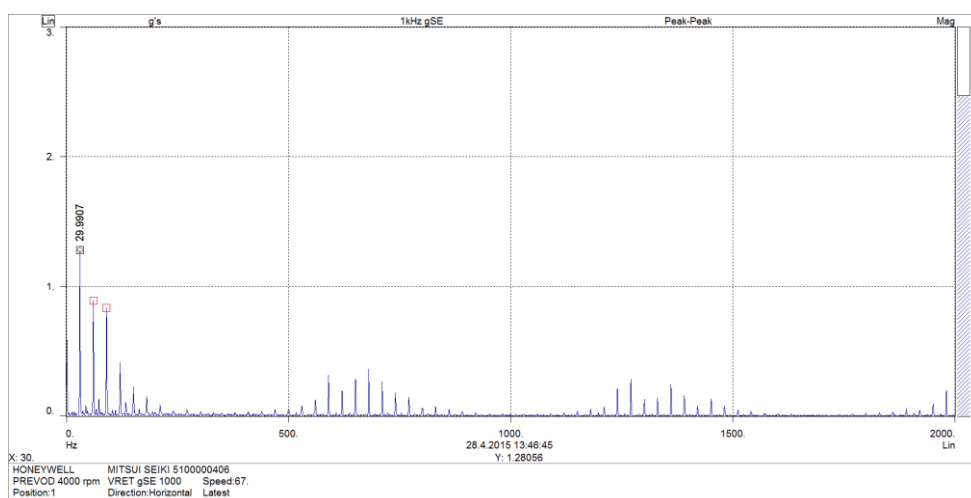
Ve spektru zrychlení vibrací vřetene v bodě L1, tedy u konce vřetene směrem do pracovního prostoru, je tato frekvence ještě výraznější, s hodnotou 30,0671Hz.



*Obr. 6-18 Spektrum zrychlení vibrací v bodě L1  
(stroj č. 5100000406 / měření č. 3)*

V posledním vyhodnocovaném spektru zrychlení vibrací, pro měření na převodovce, je potvrzeno již výše konstatované zjištění – problém má svůj původ v převodovce.

Na převodovce, jak bylo patrné už v rychlosti vibrací je frekvence na hranici 29Hz nejvýraznější. Zároveň jsou viditelné výrazné harmonické násobky.



*Obr. 6-19 Spektrum zrychlení vibrací převodovky  
(stroj č. 5100000406 / měření č. 3)*

### 6.1.2 Závěry z vyhodnocení měření Mitsui Seiki HS5A č. 5100000406

Z jednotlivých měření stroje Mitsui Seiki s č. 5100000406, bylo velice těžké odhalit pravou příčinu zvýšené hladiny vibrací v bodě L1, tedy na předním ložisku vřetene. Ve vyhodnocovaných spektrech, ať už v případě rychlosti nebo zrychlení vibrací, byly vždy znatelné zvýšené amplitudy na frekvencích, které nemají souvislost s frekvencí otáčení.

Dle získaných poznatků z měření, je tedy možné konstatovat, že hlavní příčina zvýšené hladiny vibrací na tomto stroji je v převodovce. Jedná se o převodovku s vloženým hřídelem, ale dostupný manuál k tomuto stroji neposkytuje více informací. Je tedy velice těžké zjistit konkrétní místo a druh poruchy, resp. opotřebení, které bylo možné na převodovce detekovat měřením vibrací.

Přes výše zmíněné je ale třeba také zmínit fakt, že počáteční zjištění, které směřovalo k diskusi o poškození předního ložiska, není možné opomíjet. Dle naměřených dat dochází na předním ložisku pravděpodobně k opotřebení ložiskové klece, což bude také potvrzeno při vyhodnocení odebraných vzorků oleje pro tribodiagnostiku.

### 6.1.3 Vyhodnocení měření Mitsui Seiki HS5A č. 5100000398

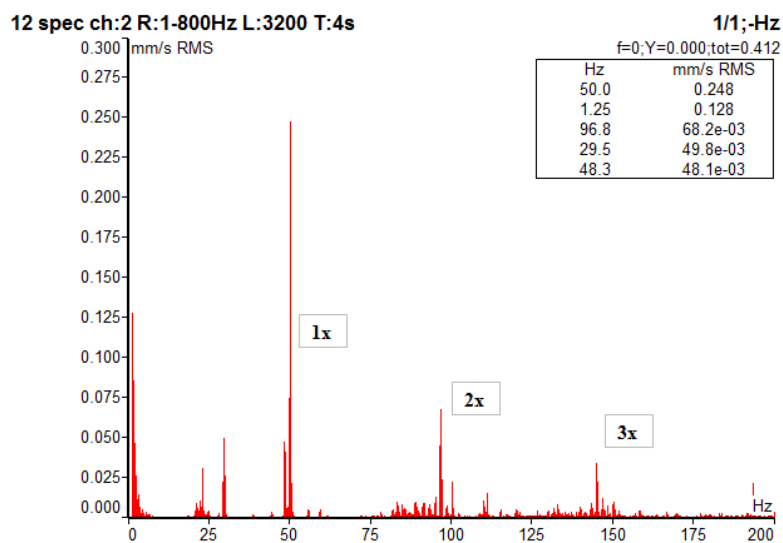
#### Měření č. 1 – 20. 1. 2015

U druhého měřeného stroje dosahují efektivní hodnoty zvýšeného stavu u rychlosti vibrací. Zrychlení vibrací je na nízké, uspokojivé úrovni. V bodě L1, je červeně zvýrazněna naměřená rychlost vibrací 0,400 mm/s v horizontálním směru.

RMS při 3000 ot/min	V <sub>e</sub> [mm/s]		a <sub>e</sub> [g]	
	L1	L2	L1	L2
ch: 1 - vertikál.	0,258	0,108	0,552	0,461
ch: 2 - horizontal.	0,400	0,149	0,510	0,640
ch: 3 - axial.	0,203	0,152	0,715	0,521

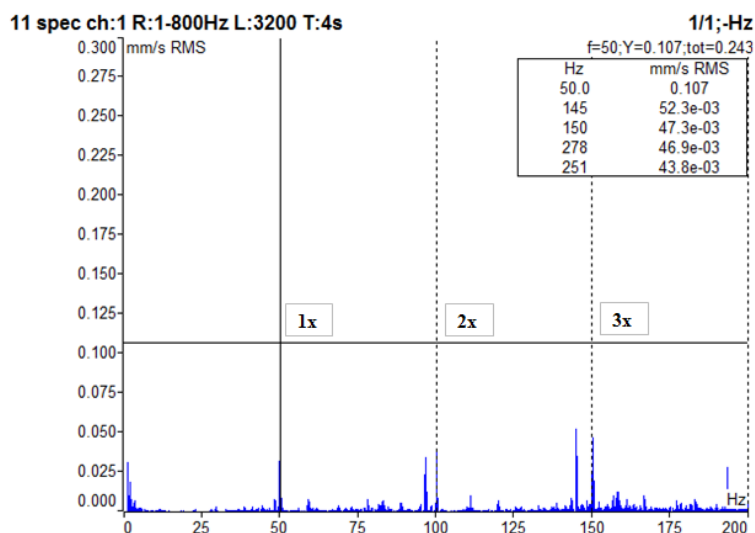
Tab. 6-6 Efektivní hodnoty rychlosti a zrychlení vibrací  
(stroj č. 5100000398 / měření č. 1)

Spektrum rychlosti vibrací v bodě L1 v horizontálním směru potvrzuje výše zmíněné. Ve spektru je patrná špička na otáčkové frekvenci odpovídající 50Hz, s hodnotou 0,248 mm/s.



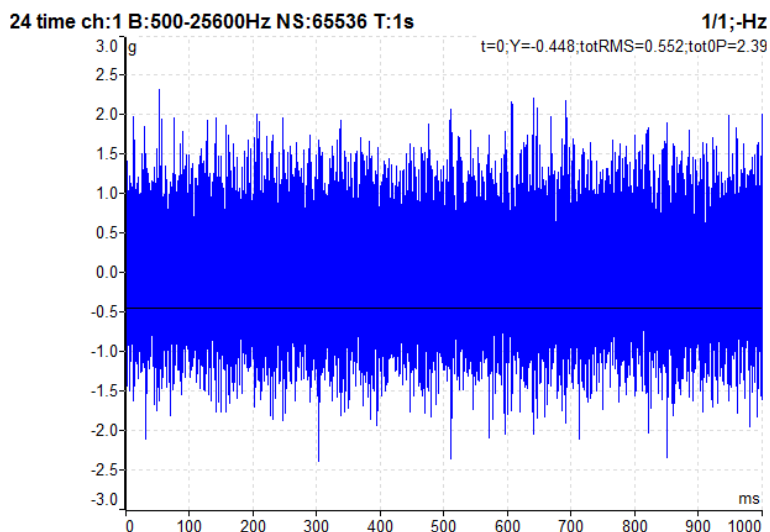
Obr. 6-20 Spektrum rychlosti vibrací v bodě L1 v horizontálním směru (stroj č. 5100000398 / měření č. 1)

Spektrum rychlosti vibrací ve směru vertikálním v bodě L1, vykazuje dominantní nevývahu na otáčkové frekvenci. Stejně jako tomu je u efektivních hodnot, je však špička na takřka poloviční úrovni, proti horizontálnímu směru. Rozdíl ve dvou směrech poukazuje na ovalitu, která může být způsobena např. nevhodným zalisováním ložiska. Vzhledem k normě ČSN 20 0065 je však stav vyhovující.



Obr. 6-21 Spektrum rychlosti vibrací v bodě L1 ve vertikálním směru (stroj č. 5100000398 / měření č. 1)

Časový signál zrychlení vibrací v obou měřených bodech není na zvýšené úrovni, jako tomu bylo u předchozího stroje.



*Obr. 6-22 Časový signál zrychlení vibrací v bodě L1 ve vertikálním směru (stroj č. 5100000398 / měření č. 1)*

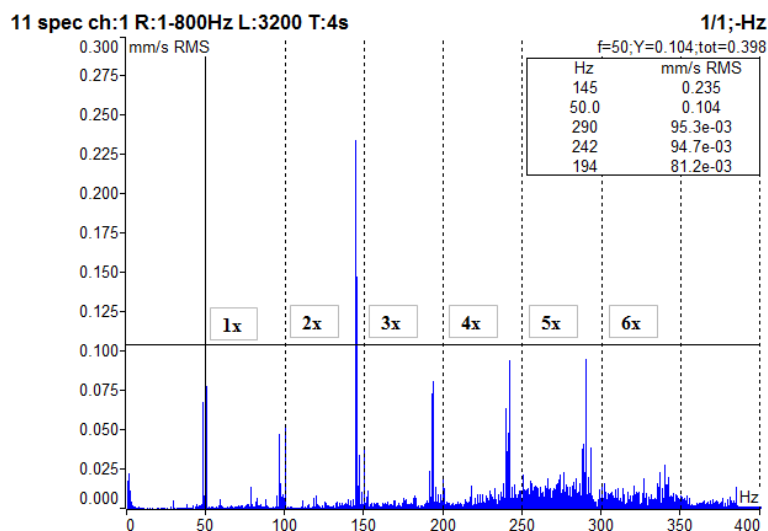
## **Měření č. 2 – 10. 3. 2015**

Rychlost vibrací v bodě L1 je opět na zvýšené úrovni a to jak ve vertikálním, tak v horizontálním směru.

RMS při 3000 ot/min	$V_e$ [mm/s]		$a_e$ [g]	
	L1	L2	L1	L2
ch: 1 - vertikál.	0,425	0,156	0,870	0,577
ch: 2 - horizontal.	0,487	0,152	0,570	0,676
ch: 3 - axial.	0,372	0,355	0,788	0,766

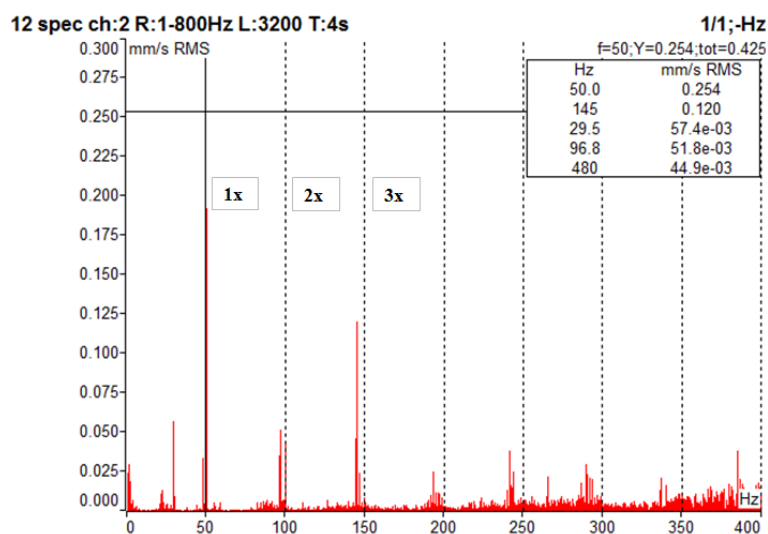
*Tab. 6-7 Efektivní hodnoty rychlosti a zrychlení vibrací (stroj č. 5100000398 / měření č. 2)*

Spektrum rychlosti vibrací v bodě L1 ve směru vertikálním, udává výraznou amplitudu na otáčkové frekvenci. Dále se ve spektru vyskytují harmonické násobky otáčkové frekvence, se špičkou na frekvenci 145Hz. Stejně jako tomu bylo u předchozího stroje, jsou i zde znatelné frekvence před vlastní otáčkovou frekvencí, které jsou pravděpodobně důsledkem dvouřadé konstrukce ložiska.



Obr. 6-23 Spektrum rychlosti vibrací v bodě L1 ve vertikálním směru (stroj č. 5100000398 / měření č. 2)

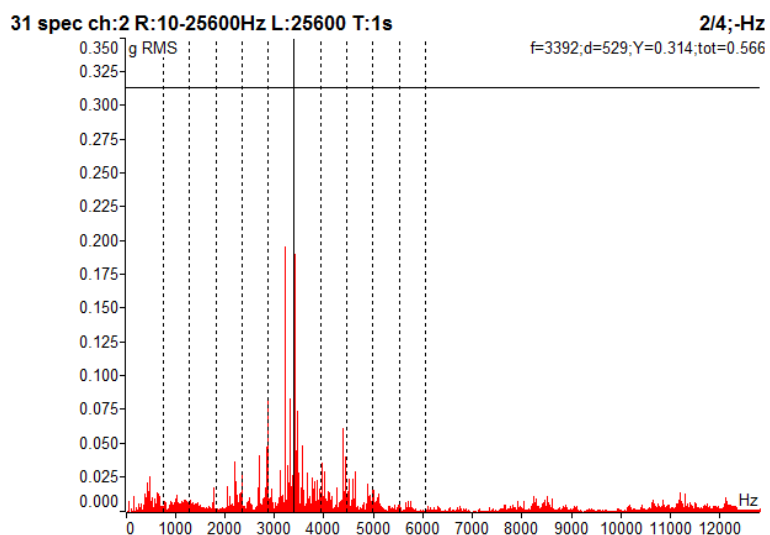
Porovnání spektra vibrací směru horizontálního a vertikálního v bodě L1 poskytuje informaci o nevývaze, jako tomu bylo při prvním měření. Rozdíl v obou směrech již není tak patrný. Co se týká efektivních hodnot, ty se pohybují přibližně na polovině maximální povolené rychlosti vibrací dle ČSN 20 0065.



Obr. 6-24 Spektrum rychlosti vibrací v bodě L1 ve vertikálním směru (stroj č. 5100000398 / měření č. 2)

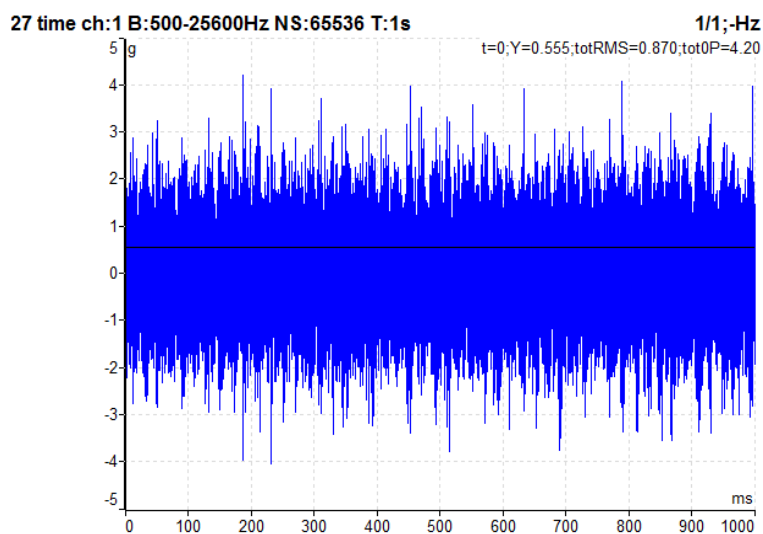
Ve spektru zrychlení v bodě L1, ve směru horizontálním je výrazná frekvence 3392Hz včetně harmonických násobů.





*Obr. 6-25 Spektrum zrychlení vibrací v bodě L1 v horizontálním směru  
(stroj č. 5100000398 / měření č. 2)*

V časovém signálu zrychlení vibrací pro bod L1 je stav dobrý, hodnoty jsou stále na nízké úrovni.



*Obr. 6-26 Časový signál zrychlení vibrací v bodě L1  
(stroj č. 5100000398 / měření č. 2)*

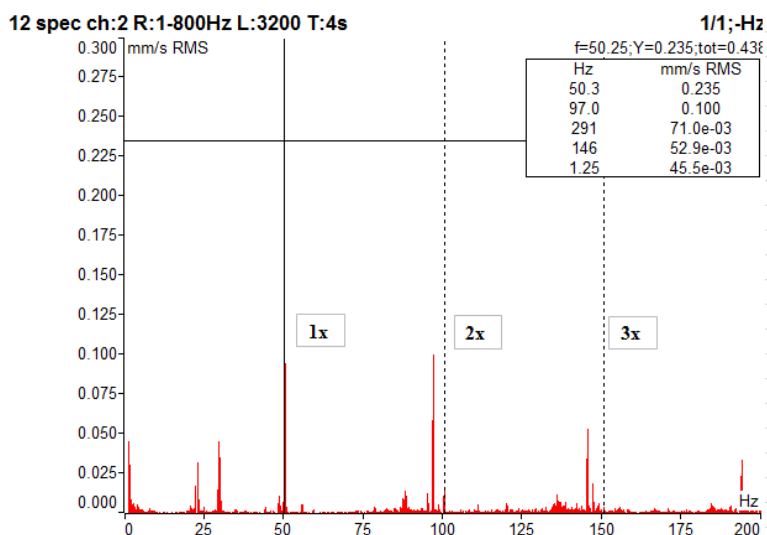
### Měření č. 3 – 21. 4. 2015

Efektivní hodnoty rychlosti a zrychlení vibrací, pro v pořadí třetí měření na stroji č. 5100000398 ukazují postupně se zhoršující trend rychlosti vibrací. Výrazné hodnoty jsou především ve směru horizontálním, jako tomu bylo u prvního měření. V ostatních směrech je rychlost vibrací také zvýšená, ne však tak výrazně. Vzhledem k normě ČSN 20 0065 je rychlost kmitání v dovolené toleranci, avšak stále se zhoršuje.

RMS při 3000 ot/min	V <sub>e</sub> [mm/s]		a <sub>e</sub> [g]	
	L1	L2	L1	L2
ch: 1 - vertikál.	0,286	0,126	0,745	0,454
ch: 2 - horizontal.	0,498	0,159	0,475	0,685
ch: 3 - axial.	0,298	0,265	0,855	0,862

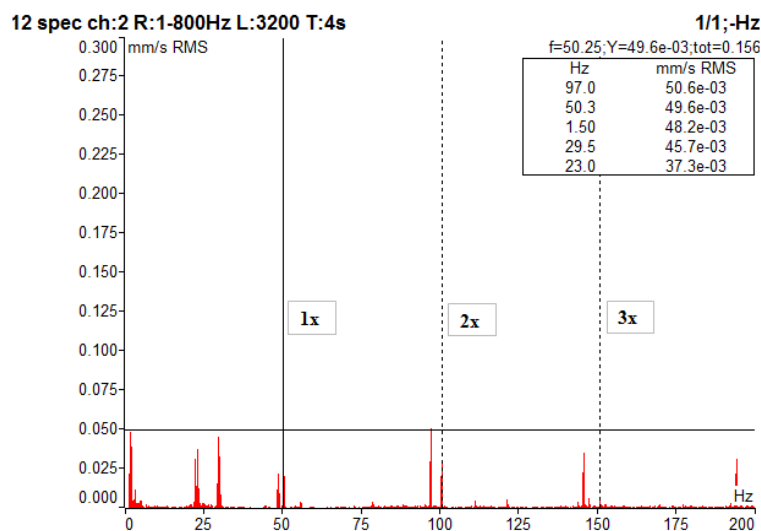
*Tab. 6-8 Efektivní hodnoty rychlosti a zrychlení vibrací  
(stroj č. 5100000398 / měření č. 3)*

Spektrum rychlosti vibrací v bodě L1, udává jako u předchozích měření výraznou amplitudu na otáčkové frekvenci. Ve spektru jsou také zvýrazněny harmonické násobky otáčkové frekvence. Dále je možné vidět neznámou frekvenci 29,1Hz. Tato frekvence se vyskytovala i u prvního měřeného stroje s č. 5100000406 a její původ byl nakonec zjištěn v převodovce. Vzhledem k tomu, že se jedná o identické stroje, je možné, že i zde dochází k vývoji poškození uvnitř převodovky. Pro ověření by však bylo nutné proměřit i motor a převodovku stroje.



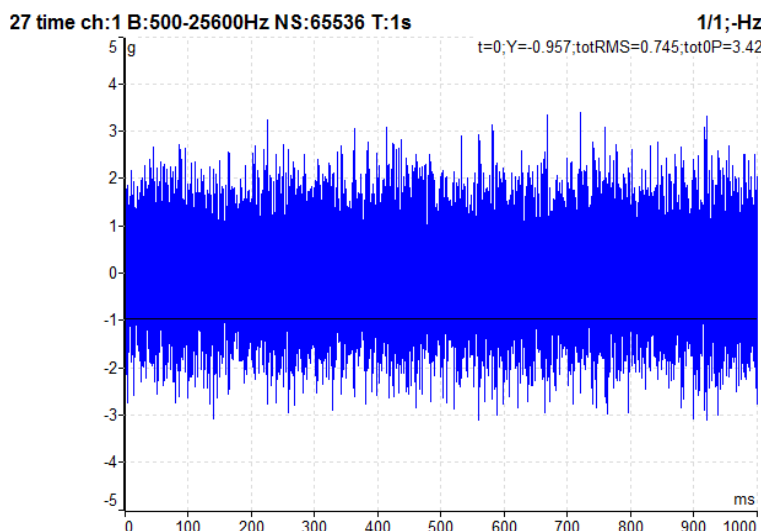
*Obr. 6-27 Spektrum rychlosti vibrací v bodě L1 v horizontálním směru  
(stroj č. 5100000398 / měření č. 3)*

V bodě L2 je rovněž označena otáčková frekvence, s harmonickými násobky. Stejně jako u bodu L1, jsou i na opačném konci vřetene znatelné frekvence s dominantními amplitudami, které nemají návaznost na otáčkovou frekvenci.



*Obr. 6-28 Spektrum rychlosti vibrací v bodě L2 v horizontálním směru (stroj č. 5100000398 / měření č. 3)*

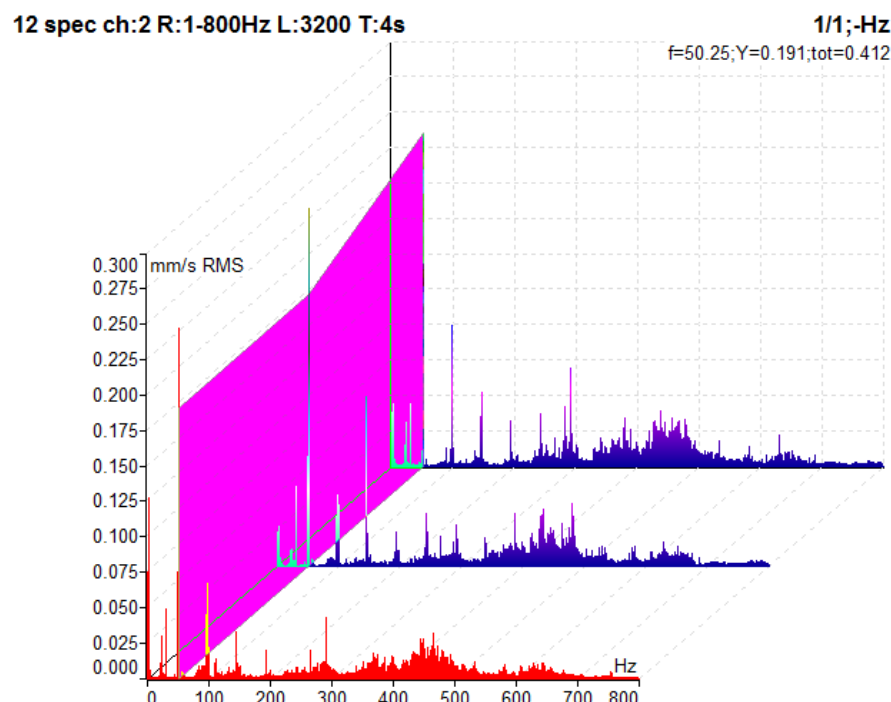
Časový signál zrychlení vibrací v obou měřených bodech je dále na nízké, dobré úrovni. Příložen je časový signál z bodu L1, měřený ve vertikálním směru, který udává nejvyšší hodnoty.



*Obr. 6-29 Časový signál zrychlení vibrací v bodě L1 ve vertikálním směru (stroj č. 5100000398 / měření č. 3)*

Pohled na trend rychlosti vibrací v bodě L1, ve směru horizontálním, potvrzuje data uvedená v tabulce efektivních hodnot.

Míra rychlosti vibrací na tomto stroji, je s každým měřením na vyšší úrovni. Rozhodně bude nutné stroj nadále opakovaně měřit, pro správné vyhodnocení stavu.



*Obr. 6-30 Trend rychlosti vibrací v bodě L1 (stroj č. 5100000398)*

#### **6.1.4 Závěry z vyhodnocení měření Mitsui Seiki HS5A č. 5100000398**

Na druhém měřeném stroji Mitsui Seiki s č. 5100000398 bylo ve všech případech naměřena zvýšená rychlost kmitání v bodě L1. První měření poukázalo na rozdíl v jednotlivých měřených směrech, tzv. ovalitu, která by mohla být způsobena nevhodnou montáží ložiska.

Ve všech realizovaných měření byly zároveň ve spektrech rychlosti vibrací detekovány frekvence, které nemají návaznost na frekvenci otáčení vřetene. Stejně jako tomu bylo u prvního měřeného stroje, by i zde bylo vhodné doměřit motor pohánějící vřeteno a převodovku. Současně by správnému odhalení závady napomohlo nahlédnutí do historie databáze oprav, zdali neobsahuje informace o přeložiskování vřetene.

Generovaná rychlost kmitání je dle platné nomy ČSN 20 0065, na vyhovující úrovni. Přesto by měl být na tento stav brán patřičný zřetel a stroj z hlediska vibrodiagnostiky pravidelně sledovat.

## 7 Tribodiagnostika

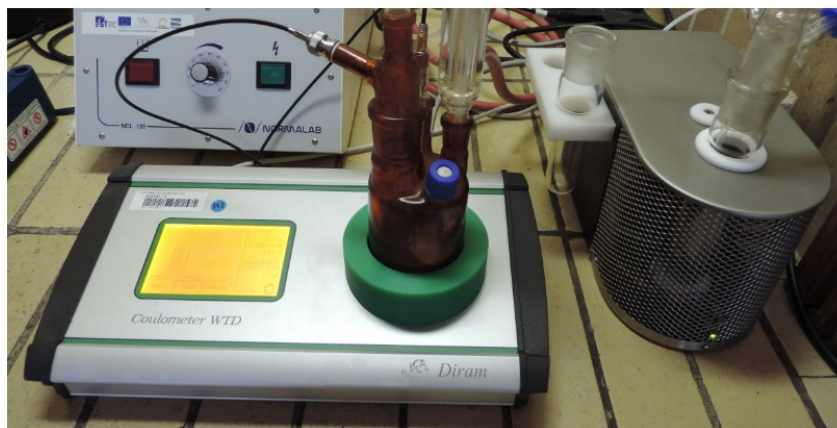
Z obou sledovaných strojů, byly ve dvou intervalech odebrány a v tribologické laboratoři vyhodnoceny vzorky oleje, z okruhu pro chlazení a mazání vřetenových ložisek. Vyhodnocení testů pro zjištění degradace oleje, je rozebráno v následujících podkapitolách. Před uvedením výsledů je třeba zmínit, že u obou strojů jsou znatelné ztráty oleje v průběhu provozu. Olej je tedy nutné v nepravidelných intervalech dolévat a touto skutečností mohou být výsledky testů ovlivněny.



*Obr. 7-1 Vzorky oleje připravené k testům degradace oleje*

### 7.1 Obsah vody

Obsah vody byl stanoven na automatickém titrátoru Coulometer WTD. Stanovení obsahu vody je zde určováno dle metody Karla Fischera. Přístroj se skládá z elektronické části a skleněné titrační nádoby s titračním roztokem. Do nádoby s titračním roztokem se vnáší analyzovaný vzorek oleje. Důležité je zaznamenání přesné navážky vzorku, která je důležitá pro vyhodnocení. Vlastní princip zjištění obsahu vody v oleji, je založen na reakci jódu s vodou - jeden mol jódu reaguje s jedním molem vody. 1mg vody je tedy úměrný 10,71 A.s. Po reakci veškeré vody s jodem je na přístroji zobrazena koncentrace vody v oleji.



Obr. 7-2 Coulometer WTD ke stanovení obsahu vody

V tabulce níže jsou uvedeny jednotlivé naměřené koncentrace vody k příslušnému stroji a datu měření.

Stanovení obsahu vody - Coulometer WTD	18. 2. 2015		30. 4. 2015	
	Navážka [g]	Koncentrace vody [%]	Navážka [g]	Koncentrace vody [%]
Mitsui Seiki HS5A / eq.n. 5100000406	2,3485	0,0043	3,813	0,0063
Mitsui Seiki HS5A / eq.n. 5100000398	3,0534	0,0041	3,4377	0,0297

Tab. 7-1 Vyhodnocení obsahu vody z odebraných vzorků oleje

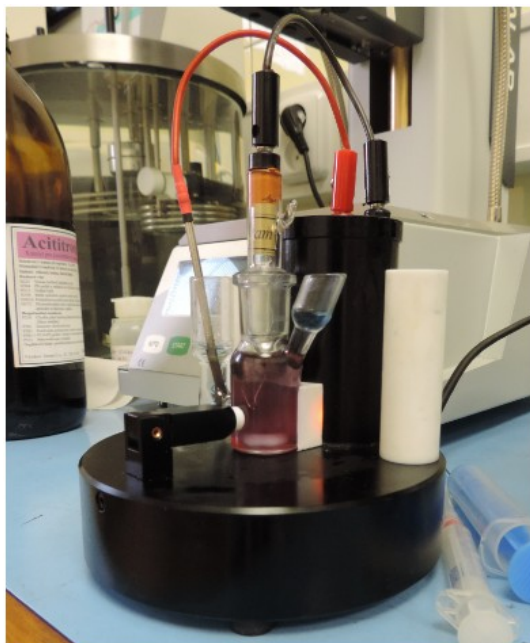
V žádném z testovaných vzorků oleje nebyla zjištěna vysoká koncentrace vody. Obecně je v mazacím oleji povoleno maximálně 0,2% hmotnostního podílu vody, této hranici se zkoumané vzorky ani zdaleka nepřibližují. Nejvyšší, červeně označená hodnota u stroje s označením č. 5100000398 je s největší pravděpodobností důsledkem kontaminace oleje při odběru nebo chybou při vyhodnocení.



Obr. 7-3 Odečet koncentrace vody z displeje přístroje Coulometer WTD

## 7.2 Stanovení čísla kyselosti

Stanovení čísla kyselosti bylo realizováno metodou titrace na barevný indikátor. Tato metoda spočívá v titraci kyselých sloučenin obsažených ve vzorku alkoholickým roztokem KOH na barevný indikátor. I v tomto případě je velice důležitá přesná navážka vzorku oleje aplikovaného do nádoby s alkoholickým roztokem.



*Obr. 7-4 Coulometer pro stanovení čísla kyselosti*

Zkoumané vzorky oleje nevykazují ani v jednom z vyhodnocení nárůst látek kyselého charakteru, které by bylo důsledkem termooxidačních jevů v oleji.

Stanovení čísla kyselosti - TAN	18. 2. 2015		30. 4. 2015	
	Navážka [g]	TAN [mg / g KOH]	Navážka [g]	TAN [mg / g KOH]
Mitsui Seiki HS5A / eq.n. 5100000406	0,0153	0,1030	0,1614	0,5410
Mitsui Seiki HS5A / eq.n. 5100000398	0,0365	0,3630	0,1030	0,5570
Referenční vzorek / Azolla ZS 32	0,0168	0,1470	-	-

*Tab. 7-2 Vyhodnocení čísla kyselosti odebraných vzorků oleje*

### 7.3 RTG spektrometrie

Pro sledování stavu opotřebení byla zvolena RTG spektrometrie. K provedení měření byl využit přístroj SPEKTRO XEPOS 3. Přístroj je vybaven rentgenovou lampou. Emitací záření z této lampy jsou vybudeny atomy ve zkoumaném vzorku a dále vyhodnocovány v plynotěsném proporcionálním snímači.

Výsledky měření vyhodnotí obsah 48 prvků, s označením dle periodické tabulky. Jednotlivé prvky jsou seřazeny sestupně, dle největšího zastoupení ve zkoumaném prvku. Jednotkou je ppm, což je výraz pro jednu miliontinu celku. Pro převod do procentuálního obsahu platí poměr  $1\% = 10\,000\text{ ppm}$ .

Pro účely diplomové práce je pro každé měření uveden výčet deseti prvků s největším zastoupením v testovaném vzorku.

V první tabulce je možné vidět vyhodnocení spektrometrie z odebraného vzorku oleje stroje s označením č. 5100000406. Ve výčtu prvků je možné vidět základní aditiva, jako je vápník, suter nebo fosfor. Červeně označený je řádek zastoupený mědi. Obsah 34,2 ppm vede k utvrzení zjištění, z měření vibrací na předním ložisku tohoto stroje. Zvýšená podíl měděných částic znamená již dříve zmíněné poškození ložiskové klece.

18. 2. 2015 Mitsui Seiki HS5A / č. 5100000406					
Z	Symbol	Element	Norm. Int.	Concentration	Abs. Error
16	S	Sulfur	8552,341	3664ppm	3ppm
15	P	Phosphorus	423,5133	416,7ppm	1,1ppm
30	Zn	Zinc	6444,215	357,5ppm	0,5ppm
29	Cu	Copper	451,9171	34,2ppm	0,2ppm
20	Ca	Calcium	13,6162	27,1ppm	0,4ppm
27	Co	Cobalt	11,1542	8,5ppm	0,7ppm
24	Cr	Chromium	14,052	6,6ppm	0,4ppm
73	Ta	Tantalum	64,8826	5,1ppm	0,2ppm
72	Hf	Hafnium	21,0353	3,2ppm	0,3ppm
25	Mn	Manganese	11,6008	1,8ppm	0,1ppm

Tab. 7-3 Výsledky spektrometrie prvního vzorku oleje ze stroje č. 5100000406

V druhém testovaném vzorku, který byl odebrán s přibližně měsíčním odstupem je opět vidět zvýšený obsah mědi, tentokrát na hodnotě 45,0ppm. Trend tedy ukazuje na postupné zhoršování stavu ložiskové klece.



30. 4. 2015 Mitsui Seiki HS5A / č. 5100000406					
Z	Symbol	Element	Norm. Int.	Concentration	Abs. Error
16	S	Sulfur	8105,468	4440ppm	3ppm
11	Na	Sodium	11,7222	1144ppm	37ppm
15	P	Phosphorus	399,0239	500,5ppm	1,3ppm
30	Zn	Zinc	5927,47	422,2ppm	0,6ppm
29	Cu	Copper	457,7486	45,0ppm	0,3ppm
20	Ca	Calcium	14,6636	38,7ppm	0,5ppm
24	Cr	Chromium	19,1011	12,4ppm	0,5ppm
27	Co	Cobalt	12,1885	12,2ppm	0,9ppm
73	Ta	Tantalum	61,3446	5,5ppm	0,3ppm
72	Hf	Hafnium	20,0886	3,9ppm	0,3ppm

Tab. 7-4 Výsledky spektrometrie druhého vzorku oleje ze stroje č. 5100000406

Součástí vyhodnocení bylo také posouzení referenčního, čistého vzorku oleje, který byl odebrán přímo ze zásobníku oleje, určenému k provoznímu doplňování. Výsledky referenčního vzorku oleje jsou platné pro porovnání se vzorky odebranými ze strojů. V referenčním vzorku je možné vidět zejména zastoupení základních aditiv.

30. 4. 2015 Referenční vzorek / Azolla ZS 32					
Z	Symbol	Element	Norm. Int.	Concentration	Abs. Error
16	S	Sulfur	17585,78	8266ppm	5ppm
58	Ce	Cerium	8,008	578ppm	100ppm
11	Na	Sodium	6,0236	< 1005ppm	(507)ppm
15	P	Phosphorus	366,2337	392,4ppm	1,2ppm
30	Zn	Zinc	5574,66	377,8ppm	0,6ppm
20	Ca	Calcium	15,0986	36,1ppm	0,5ppm
73	Ta	Tantalum	60,7292	12,8ppm	0,3ppm
27	Co	Cobalt	10,7382	9,9ppm	0,8ppm
24	Cr	Chromium	11,8324	6,4ppm	0,4ppm
72	Hf	Hafnium	18,8799	4,1ppm	0,2ppm

Tab. 7-5 Výsledky spektrometrie referenčního vzorku oleje

Olej odebraný z druhého zkoumaného stroje s označením č. 5100000398 nenese stopy výskytu otěrových prvků. Zejména u tohoto stroje je ale třeba zmínit velký únik olejové soustavy, který může vést k znehodnocení tohoto testu.

18. 2. 2015 Mitsui Seiki HS5A / č. 5100000398					
Z	Symbol	Element	Norm. Int.	Concentration	Abs. Error
16	S	Sulfur	11475,33	4759ppm	3ppm
15	P	Phosphorus	386,8544	368,0ppm	1,0ppm
30	Zn	Zinc	6116,454	335,4ppm	0,5ppm
20	Ca	Calcium	16,8957	35,6ppm	0,5ppm
27	Co	Cobalt	13,1535	10,2ppm	0,7ppm
73	Ta	Tantalum	60,9352	10,0ppm	0,3ppm
24	Cr	Chromium	12,8792	5,9ppm	0,3ppm
29	Cu	Copper	55,1481	4,1ppm	0,1ppm
72	Hf	Hafnium	18,0045	3,1ppm	0,2ppm
25	Mn	Manganese	11,754	1,9ppm	0,1ppm

Tab. 7-6 Výsledky spektrometrie prvního vzorku oleje ze stroje č. 5100000398

Druhý odebraný vzorek, rovněž ukazuje obsah používaných aditiv oleje mezi prvky s největším zastoupením. Červeně označena je hodnota hliníku s obsahem 284,5ppm. Tato skutečnost vznikla s největší pravděpodobností kontaminací vzorku při odbírání z nádrže nebo při periodickém doplňování oleje. Pro ověření by bylo nutné opětovné odebrání vzorků.

30. 4. 2015 Mitsui Seiki HS5A / č. 5100000398					
Z	Symbol	Element	Norm. Int.	Concentration	Abs. Error
16	S	Sulfur	16557,97	9271ppm	6ppm
11	Na	Sodium	7,6244	< 1005ppm	(724)ppm
15	P	Phosphorus	370,3499	469,7ppm	1,4ppm
30	Zn	Zinc	5657,067	446,2ppm	0,7ppm
13	Al	Aluminum	41,0012	284,5ppm	3,8ppm
20	Ca	Calcium	21,626	69,3ppm	0,8ppm
24	Cr	Chromium	25,2538	18,2ppm	0,6ppm
73	Ta	Tantalum	59,425	14,3ppm	0,3ppm
27	Co	Cobalt	11,2312	11,9ppm	1,0ppm
28	Ni	Nickel	63,1719	8,3ppm	0,1ppm

Tab. 7-7 Výsledky spektrometrie druhého vzorku oleje ze stroje č. 5100000398

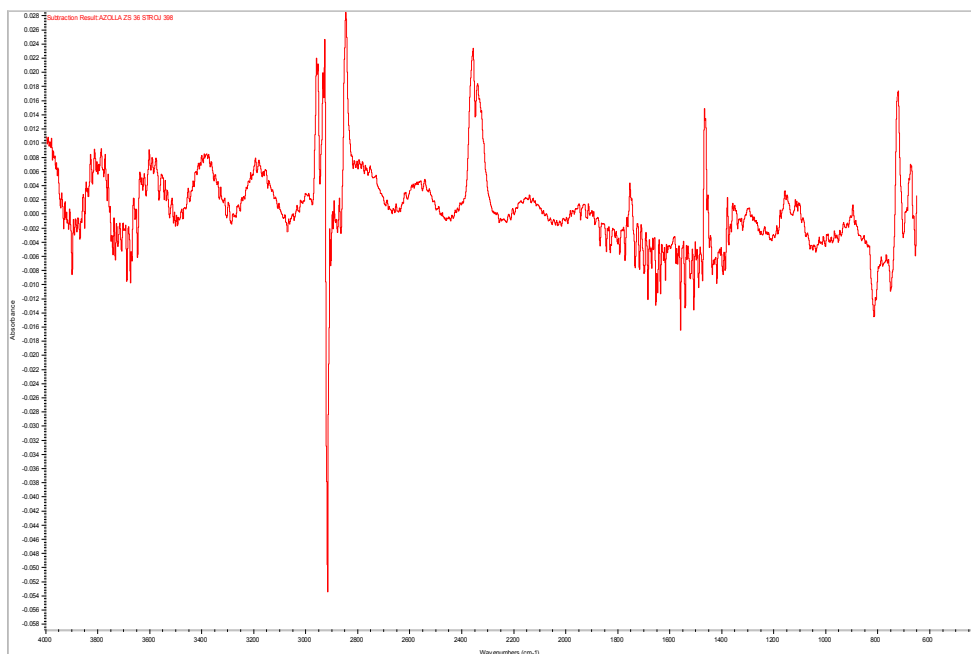
## 7.4 Spektrální analýza FT-IR

Ke stanovení obsahu oxidačních produktů a ke stanovení úbytku antioxidantů, byla využita infračervená spektrometrie s Fourierovou transformací (FT-IR). Zkouška byla provedena na spektrometu Nicolet, model Impact 410 a poté vyhodnocena v software Omnic.

Na dno nádoby z krystalu selenidu zinečnatého ZnSe, byla nanесena tenká vrstva zkoumaného oleje. Záření krystalem prochází (odráží se) a současně proniká do vzorku oleje v hloubce 1 – 2  $\mu\text{m}$ . Vzorek poté absorbuje záření vlnových délek, které odpovídá molekulárnímu složení zkoumaného vzorku.

Výsledné spektrum je grafickým vyobrazením funkční závislosti energie v jednotkách absorbance na vlnové délce dopadajícího záření. Absorbance je definována jako dekadický logaritmus  $1/T$  (Transmittance), vyjadřující poměr intenzity záření, které prošlo vzorkem, vzhledem k intenzitě záření vycházející ze zdroje.

Na následujícím obrázku je možné vidět infračervené spektrum stroje s označením č. 5100000398. Ve vzorku zkoumaného oleje není patrné zvýšené množství oxidačních produktů ani snížené množství antioxidantu.

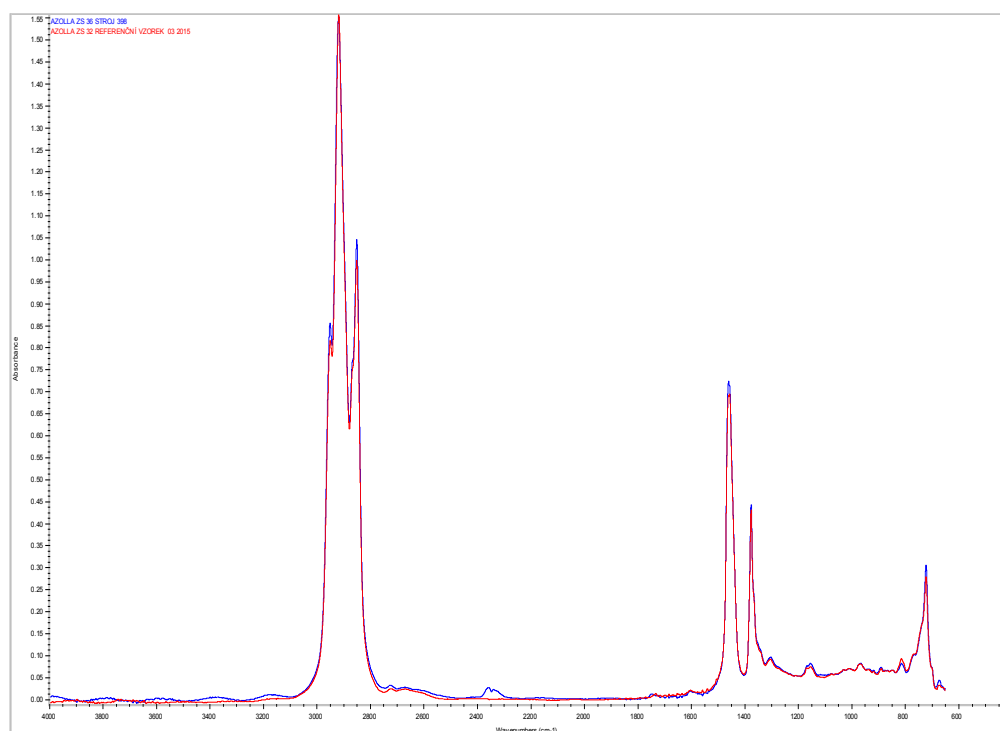


*Obr. 7-5 Infračervené spektrum stroje č. 5100000398*

Oxidační produkty	0,02 A/.1 mm
Antioxidant	79,3 %

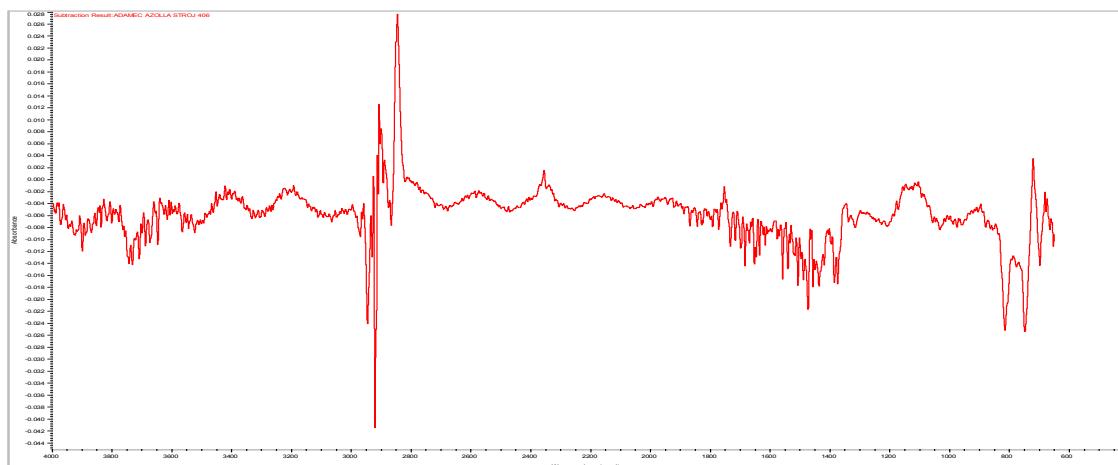
*Tab. 7-8 Obsah oxidačních produktů a stav antioxidantů vzorku č. 5100000398*

Výše zmíněné je také vidět ve srovnání infračerveného spektra vzorku stroje č. 5100000398 a referenčního vzorku oleje.



*Obr. 7-6 Infračervené spektrum referenčního vzorku oleje a vzorku ze stroje č. 5100000398*

U druhého zkoumaného stroje, resp. vzorku oleje č.5100000406 je situace obdobná. Není znatelný zvýšený obsah oxidačních produktů, obsah antioxidantů je na dobré úrovni.

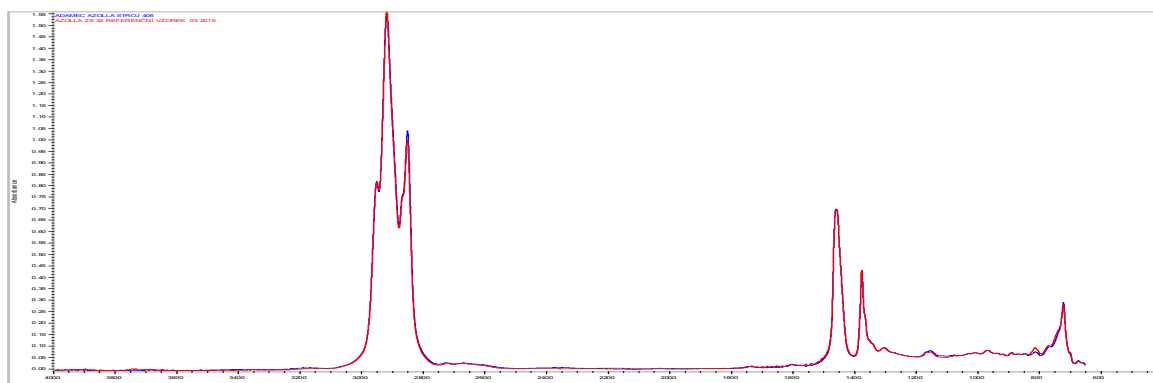


*Obr. 7-7 Infračervené spektrum stroje č. 5100000406*

Oxidační produkty	0,01 A/.1 mm
Antioxidant	75,4 %

*Tab. 7-9 Obsah oxidačních produktů a stav antioxidantů vzorku č. 5100000406*

Srovnání referenčního vzorku oleje s vzorkem oleje č. 5100000406 opět nevykazuje výraznou odchylku od normálního stavu.



*Obr. 7-8 Infračervené spektrum referenčního vzorku oleje a vzorku ze stroje č. 5100000406*

## 8 Závěr

Cílem mé diplomové práce, bylo praktické využití technické diagnostiky v údržbě obráběcích strojů. V průběhu zpracování tématu a to zejména při vlastním měření a vyhodnocování získaných dat, bylo možné ověřit si znalosti získané v průběhu studia. Právě při sběru a vyhodnocování dat je opravdu důležitá teoretická příprava, ale hlavně praktické znalosti, které nelze získat pouze studiem. Technická diagnostika je rozhodně obor, který při správném zařazení do systému údržby umožňuje zvýšit efektivitu nejen údržby jako takové, ale také efektivitu výrobního podniku.

Pro účely diplomové práce byla vybrána dvě obráběcí centra Mitsui Seiki HS5A, ve výrobním závodu Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. Na obou zvolených strojích byla ve třech intervalech provedena vibrodiagnostika včetně a zároveň ve dvou termínech odebrány vzorky oleje, z okruhu pro mazání vřetenových ložisek. Tyto vzorky byly následně vyhodnoceny v tribologické laboratoři. Závěry z vyhodnocení, jsou uvedeny jako dílčí závěry v příslušných kapitolách pro jednotlivá měření. Krom doporučení pro další provoz strojů, je vhodné zmínit také návrh na interní úpravu systému údržby, respektive směrnic a postupů, kterými je údržba v Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. řízena.

První doporučení vyplývající z této práce, je implementace technické diagnostiky, resp. vibrodiagnostiky a tribodiagnostiky do plánované údržby obráběcích strojů. Implementace by měla zahrnovat i stanovení přesné metodiky měření pro konkrétní stroje, zajišťující opakovatelnost měření a správnost vyhodnocených dat. Diagnostika skutečného stavu je důležitá zejména u těch strojů, u kterých je obtížně alternována výroba v případě neplánované odstávky. Dalším bodem je propojení externě řešeného olejového hospodářství, s vlastním systémem plánované údržby, pro účely multiparametrické diagnostiky a komplexní vyhodnocení dat. Zařazením technické diagnostiky do systému údržby Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o., je dle mého názoru možné dosáhnout jak zvýšení provozní spolehlivosti strojů, tak pozitivního ovlivnění výrobních metrik.

## 9 Seznam použité literatury

- [1] HELEBRANT, F. *Technická diagnostika a spolehlivost - IV. Provoz a údržba strojů*. VŠB-TUO, Ostrava 2008, 130 s. ISBN 978-80-248-1690-6.
- [2] HELEBRANT, F. – ZIEGLER, J. *Technická diagnostika a spolehlivost – II. Vibrodiagnostika*. VŠB-TUO, Ostrava 2005, 178 s. ISBN 80 -248 – 0650 – 9.
- [3] ZIEGLER, J. – HELEBRANT, F. – MARASOVÁ, D. *Technická diagnostika a spolehlivost – I. Tribodiagnostika*. VŠB-TUO, Ostrava 2001, 155 s. ISBN 80-7078-883-6.
- [4] BLATA, J. – JURASZEK, J. *Metody technické diagnostiky teorie a praxe*, VŠB-TU, Ostrava 2013, 133 s. ISBN 978 – 80 -248 – 2997 – 5 [online], [cit. 2015-2-7].  
< <http://interdiago.vsb.cz/kom/upload/18-MetodyTechnickeDiagnostiky.pdf> >
- [5] BILOŠ, J. – BILOŠOVÁ, A. *Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktéra a vývojářů: část Vibrační diagnostika* VŠB-TUO, Ostrava 2012, 142 s. [online], [cit. 2015-2-8].  
< <http://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2755-1.pdf> >
- [6] KREIDL, M. – ŠMÍD, R. *Technická diagnostika*. BEN – technická literatura, Praha 2006, 408 s. ISBN 80 – 7300 – 158 – 6.
- [7] MAREK, J. a kol. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. MM publishing s.r.o., Praha 2010, 420 s. ISBN 978 – 80 – 254 – 7980 – 3.
- [8] VDOLEČEK, F. *Technická diagnostika v systémech údržby* [online], [cit. 2015-2-7].  
<<http://automa.cz/res/pdf/37313.pdf>>
- [9] ČSN 20 0065, *Metody měření a hodnocení mechanického kmitání, mezní hodnoty kmitání*. Vydavatelství norem, Praha 1992, 16s.
- [10] Internetové stránky společnosti SKF  
<[www.skf.com/cz/](http://www.skf.com/cz/)>

- [11] NOHÁL, L. *Deskripce vřeten obráběcích strojů (BP)*, VUT v Brně, Brno 2008, 48 s. [online], [cit. 2015-3-14].  
< [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=5798](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5798) >
- [12] KOLÁŘ, P. *Vysokootáčková vřetena obráběcích strojů (teze disertační práce)*, ČVUT v Praze, Praha 2007, 36 s. [online], [cit. 2015-3-15].  
<[http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12135-VSZ/download/PGS\\_stud/PGS-Teze\\_-\\_Kolar.pdf](http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12135-VSZ/download/PGS_stud/PGS-Teze_-_Kolar.pdf)>
- [13] Integrovaná vřetena obráběcích strojů [online], [cit. 2015-3-2].  
<<http://www.prumysl.cz/obrabeci-stroje-integrovana-vretena-obrabecich-stroju/>>
- [14] Měření vibrací pro diagnostiku opotřebení strojů [online], [cit. 2015-3-14].  
<<http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/mereni-vibraci-pro-diagnostiku-opotrebeni-stroju.html>>
- [15] Accelerometers [online], [cit. 2015-3-21].  
<[http://www.industrial-electronics.com/DAQ/industrial\\_electronics/input\\_devices\\_sensors\\_transducers\\_transmitters\\_measurement/Accelerometers.html](http://www.industrial-electronics.com/DAQ/industrial_electronics/input_devices_sensors_transducers_transmitters_measurement/Accelerometers.html)>
- [16] Vědecko-výzkumná činnost oddělení diagnostiky a životního prostředí [online], [cit. 2015-3-19].  
< <http://www.upce.cz/dfjp/kdpd/veda/ekologie.html> >
- [17] [www.steelnumber.com](http://www.steelnumber.com) [online], [cit. 2015-4-11].  
<[http://www.steelnumber.com/en/steel\\_alloy\\_composition\\_eu.php?name\\_id=1325](http://www.steelnumber.com/en/steel_alloy_composition_eu.php?name_id=1325)>
- [18] Interní podklady společnosti Honeywell Aerospace Olomouc, s.r.o.
- [19] Návod k obsluze společnosti Adash, spol. s.r.o. [online], [cit. 2015-4-9].  
<[http://www.adash.cz/doc/a4400/A4400\\_man\\_CZ.pdf](http://www.adash.cz/doc/a4400/A4400_man_CZ.pdf)>



## 10 Seznam obrázků

Obr. 2-1 Provozní spolehlivost v průběhu života zařízení [1] .....	13
Obr. 2-2 Generační vývoj systémů údržby [1] .....	13
Obr. 2-3 Schéma modelu údržby po poruše [8] .....	14
Obr. 2-4 Schéma modelu preventivní údržby [8] .....	15
Obr. 2-5 Schéma systému prediktivní údržby [8] .....	16
Obr. 2-6 Schéma systému proaktivní údržby [8] .....	17
Obr. 3-1 Vanova křivka [4] .....	19
Obr. 3-2 Veličiny popisující harmonický pohyb [5] .....	20
Obr. 3-3 Fázový posun výchylky, rychlosti a zrychlení vibrací [5] .....	22
Obr. 3-4 Řez snímačem rychlosti vibrací [14] .....	23
Obr. 3-5 Řez akcelerometrem s vyobrazením jednotlivých částí [15] .....	24
Obr. 3-6 Tlakový akcelerometr [5] .....	25
Obr. 3-7 Smykový akcelerometr [5] .....	25
Obr. 3-8 Ohybový akcelerometr [5] .....	25
Obr. 3-9 Skládání časového signálu a frekvenční spektrum [4] .....	27
Obr. 3-10 Ferrografická analýza otěrových částic separovaných z motorových olejů [16] .....	29
Obr. 4-1 Skladba vřetene [7] .....	30
Obr. 4-2 Faktory ovlivňující přesnost obráběcích strojů [7] .....	31
Obr. 4-3 Uložení vřetena do skříně (vlevo) a do tubusu (vpravo) [11] .....	31
Obr. 4-4 Náhon vřetene řemenem u brusky Cincinnati Milacron Heald 273A .....	32
Obr. 4-5 Řez elektrovřetenem [13] .....	33

Obr. 4-6 Používaná ložiska ve vřetenech obráběcích strojů [7] .....	35
Obr. 4-7 Uložení s dvouřadým válečkovým ložiskem [10].....	35
Obr. 4-8 Uložení v ložiskách s kosoúhlým stykem [10].....	36
Obr. 4-9 Uložení v ložiskách kuželíkových [10] .....	37
Obr. 4-10 Diagram s intervaly domazávání dle SKF [10].....	38
Obr. 4-11 Mazání s nuceným oběhem [10] .....	39
Obr. 4-12 Mazání vstřikováním oleje [10] .....	40
Obr. 4-13 Systém mazání olej-vzduch [10] .....	40
Obr. 5-1 Ukázka výroby v Honeywell Aerospace Olomouc [18] .....	41
Obr. 5-2 Obráběcí centrum Mitsui Seiki HS5A umístěné v závodě HAO .....	43
Obr. 5-3 schematický řez vřetenem obráběcího centra Mitsui Seiki HS5A [18] .....	45
Obr. 5-4 Přehled součástí pro údržbu – ložiska vřetene z manuálu Mitsui Seiki [18] .....	45
Obr. 5-5 Dvouřadé válečkové ložisko zastavěné ve vřetenu obráběcího centra Mitsui Seiki [10].....	46
Obr. 6-1 Analyzátor Adash A4400 VA4 PRO se zapojením třech kanálů.....	47
Obr. 6-2 Umístění měřících bodů na vřetenu spolu se zapojenými snímači .....	49
Obr. 6-3 Spektrum rychlosti vibrací v bodě L1 v horizontálním směru.....	51
Obr. 6-4 Spektrum rychlosti vibrací v bodě L2 v horizontálním směru.....	51
Obr. 6-5 Spektrum zrychlení vibrací v bodě L2 v horizontálním směru .....	52
Obr. 6-6 Spektrum zrychlení vibrací v bodě L1 v horizontálním směru .....	52
Obr. 6-7 Časový signál zrychlení vibrací v bodě L1 ve vertikálním směru .....	53
Obr. 6-8 Spektrum rychlosti vibrací v bodě L1 v horizontálním směru.....	54

Obr. 6-9 Spektrum rychlosti vibrací v bodě L1 v horizontálním směru při měření bez nástroje (stroj č. 5100000406 / měření č. 2) .....	54
Obr. 6-10 Spektrum rychlosti vibrací v bodě L2 v horizontálním směru .....	55
Obr. 6-11 Spektrum rychlosti vibrací v bodě L1 v horizontálním směru s vyznačením poruchové frekvence ložiskové klece (stroj č. 5100000406 / měření č. 2) .....	55
Obr. 6-12 Spektrum zrychlení vibrací v bodě L1 v horizontálním směru při měření bez nástroje (stroj č. 5100000406 / měření č. 2) .....	56
Obr. 6-13 Spektrum rychlosti vibrací v bodě L2 v horizontálním směru při měření bez nástroje (stroj č. 5100000406 / měření č. 3) .....	57
Obr. 6-14 Spektrum rychlosti vibrací v bodě L2 v horizontálním směru .....	58
Obr. 6-15 Spektrum rychlosti vibrací motoru (stroj č. 5100000406 / měření č. 3) .....	58
Obr. 6-16 Spektrum rychlosti vibrací na převodovce .....	59
Obr. 6-17 Spektrum zrychlení vibrací motoru (stroj č. 5100000406 / měření č. 3) .....	59
Obr. 6-18 Spektrum zrychlení vibrací v bodě L1 .....	60
Obr. 6-19 Spektrum zrychlení vibrací převodovky .....	60
Obr. 6-20 Spektrum rychlosti vibrací v bodě L1 v horizontálním směru (stroj č. 5100000398 / měření č. 1) .....	62
Obr. 6-21 Spektrum rychlosti vibrací v bodě L1 ve vertikálním směru .....	62
Obr. 6-22 Časový signál zrychlení vibrací v bodě L1 ve vertikálním směru .....	63
Obr. 6-23 Spektrum rychlosti vibrací v bodě L1 ve vertikálním směru (stroj č. 5100000398 / měření č. 2) .....	64
Obr. 6-24 Spektrum rychlosti vibrací v bodě L1 ve vertikálním směru (stroj č. 5100000398 / měření č. 2) .....	64
Obr. 6-25 Spektrum zrychlení vibrací v bodě L1 v horizontálním směru .....	65
Obr. 6-26 Časový signál zrychlení vibrací v bodě L1 .....	65

Obr. 6-27 Spektrum rychlosti vibrací v bodě L1 v horizontálním směru .....	66
Obr. 6-28 Spektrum rychlosti vibrací v bodě L2 v horizontálním směru .....	67
Obr. 6-29 Časový signál zrychlení vibrací v bodě L1 ve vertikálním směru .....	67
Obr. 6-30 Trend rychlosti vibrací v bodě L1 (stroj č. 5100000398) .....	68
Obr. 7-1 Vzorky oleje připravené k testům degradace oleje .....	69
Obr. 7-2 Coulometer WTD ke stanovení obsahu vody .....	70
Obr. 7-3 Odečet koncentrace vody z displeje přístroje Coulometer WTD.....	70
Obr. 7-4 Coulometer pro stanovení čísla kyselosti .....	71
Obr. 7-5 Infračervené spektrum stroje č. 5100000398 .....	75
Obr. 7-6 Infračervené spektrum referenčního vzorku oleje a vzorku ze stroje .....	76
Obr. 7-7 Infračervené spektrum stroje č. 5100000406 .....	77
Obr. 7-8 Infračervené spektrum referenčního vzorku oleje a vzorku ze stroje .....	77

## 11 Seznam tabulek

Tab. 3-1 Hodnocení mechanického kmitání obráběcích strojů dle normy .....	26
Tab. 4-1 Porovnání vlastností keramických a ocelových ložisek [7] .....	34
Tab. 4-2 Charakteristika uložení s dvouřadým válečkovým ložiskem [7] .....	36
Tab. 4-3 Charakteristika uložení v ložiskách s kosoúhlým stykem [7] .....	36
Tab. 4-4 Charakteristika uložení v ložiskách kuželíkových [7] .....	37
Tab. 5-1 Základní technické údaje obráběcího centra Mitsui Seiki HS5A [18] .....	44
Tab. 5-2 Materiálové složení ložiskové klece válečkových ložisek [17] .....	46
Tab. 6-1 Základní technické parametry analyzátoru Adash A4400 VA4 PRO [19] .....	48
Tab. 6-2 Podmínky měření .....	49
Tab. 6-3 Efektivní hodnoty rychlosti a zrychlení vibrací .....	50
Tab. 6-4 Efektivní hodnoty rychlosti a zrychlení vibrací .....	53
Tab. 6-5 Efektivní hodnoty rychlosti a zrychlení vibrací stroje č. 5100000406 (stroj č. 5100000406 / měření č. 3) .....	56
Tab. 6-6 Efektivní hodnoty rychlosti a zrychlení vibrací .....	61
Tab. 6-7 Efektivní hodnoty rychlosti a zrychlení vibrací .....	63
Tab. 6-8 Efektivní hodnoty rychlosti a zrychlení vibrací .....	66
Tab. 7-1 Vyhodnocení obsahu vody z odebraných vzorků oleje .....	70
Tab. 7-2 Vyhodnocení čísla kyselosti odebraných vzorků oleje .....	71
Tab. 7-3 Výsledky spektrometrie prvního vzorku oleje ze stroje č. 5100000406 .....	72
Tab. 7-4 Výsledky spektrometrie druhého vzorku oleje ze stroje č. 5100000406 .....	73
Tab. 7-5 Výsledky spektrometrie referenčního vzorku oleje .....	73

Tab. 7-6 Výsledky spektrometrie prvního vzorku oleje ze stroje č. 5100000398 .....	74
Tab. 7-7 Výsledky spektrometrie druhého vzorku oleje ze stroje č. 5100000398 .....	74
Tab. 7-8 Obsah oxidačních produktů a stav antioxidantů vzorku č. 5100000398.....	76
Tab. 7-9 Obsah oxidačních produktů a stav antioxidantů vzorku č. 5100000406.....	77